



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**STUDIUM VLIVU VNESENÉHO PROVZDUŠNĚNÍ  
NA PARAMETRY PROVZDUŠNĚNÝCH BETONŮ**

STUDY OF EFFECT OF THE INTRODUCED PARAMETERS TO AERATE OF AERATED  
CONCRETE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Libor Urbánek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ADAM HUBÁČEK, Ph.D.**

**BRNO 2017**



## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Libor Urbánek
<b>Název</b>	Studium vlivu vneseného provzdušnění na parametry provzdušněných betonů
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2016
<b>Datum odevzdání</b>	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,  
MBA  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,  
MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Pierre-Claude Aïtcin: Vysokohodnotný beton

Časopis Beton TKS

ČSN EN 206 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

Technické kvalitativní podmínky MD ČR pro stavby pozemních komunikací: Kapitola

18 TKP - beton pro konstrukce

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

České a zahraniční časopisy

Internetové zdroje

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce bude shrnutí poznatků o provzdušněných betonech, zejména studium posouzení vneseného provzdušnění do čerstvého betonu na jeho vlastnosti v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. Důraz bude kladen zejména na posouzení míry provzdušnění v čerstvém betonu, v porovnání s různými parametry betonu ztvrdlého, zejména obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu a trvanlivosti betonu.

Základní body bakalářské práce budou následující:

- Popis a shrnutí dosavadních znalostí o provzdušněných betonech,
- popis možností srovnání zkoušek distribuce vzduchových pórů v čerstvém betonu (tzv. AVA test) a ve ztvrdlém betonu,
- popis jednotlivých typů provzdušňovacích přísad vyráběných na bázi různých druhů účinných látek a jejich kompatibilita s jednotlivými druhy plastifikačních přísad,
- vliv různých typů provzdušňovacích přísad na vlastnosti čerstvých a ztvrdlých betonů, zejména s ohledem na trvanlivost betonu.

Část bakalářské práce bude zaměřena na praktické aplikace provzdušněného betonu s použitím různých kombinací provzdušňovací přísada - plastifikační přísada, a posouzením vlivu takto vneseného provzdušnění na vlastnosti betonu. Sledovány budou zejména parametry provzdušnění, konkrétně distribuce vzduchových pórů v čerstvém betonu pomocí přístroje AVA test (Air Void Analyzer) a posouzení distribuce vzduchových pórů a součinitele rozložení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. Míra provzdušnění se bude pohybovat pro každou recepturu na dvou hodnotách

a to 4,0-4,5 % a 6,5-7,0 % provzdušnění v čerstvém betonu.

Sledován bude také vliv těchto parametrů na trvanlivost betonu, hlavně na odolnost betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek.

Rozsah práce cca 50 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na provzdušněné betony, jejich parametry složení a vlastnosti. Dále se práce zaměřuje na studium vlivu vneseného provzdušnění do čerstvého betonu, na jeho vlastnosti v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. Důraz je kladen na posouzení míry provzdušnění v čerstvém betonu, v porovnání s různými parametry betonu ztvrdlého, zejména obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu a trvanlivosti betonu. Shrnutí je doplněno popisem zkoušek distribuce vzduchových pórů v čerstvém a ztvrdlém betonu, popisem jednotlivých provzdušňovacích přísad a porovnáním vlivu provzdušňovacích přísad na trvanlivost betonu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Provzdušněný beton, vlastnosti, trvanlivost, kamenivo, drobné kamenivo, obsah jemných podílů, účinný vzduch, odolnost proti CHRL.

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis is focused on aerated concrete, their parameters of composition and properties. Further, the thesis focuses on the study of the effect of the introduced aeration on fresh concrete on its properties in both fresh and hardened state. Emphasis is placed on the assessment of the aeration rate in fresh concrete, as compared to the various parameters of hardened concrete, especially the content of hardened concrete and the durability of concrete. The study is complemented by a description of air pore distribution tests in fresh and hardened concrete, a description of individual aeration additives and a study of the influence of aeration additives on the durability of concrete.

## **KEYWORDS**

Aerated concrete, properties, durability, aggregate, fine aggregate, fine particle content, efficient air, resistant against chemical de-icing agents.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Libor Urbánek Studium vlivu vneseného provzdušnění na parametry provzdušněných betonů. Brno, 2017. 75 s., 81 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2017

---

Libor Urbánek  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Adamu Hubáčkovi, PhD., a pracovníkům centra AdMaS, za ochotu a spolupráci při zpracovávání bakalářské práce. Poděkování patří také Vladimíru Klímovi za ochotu při zkoušení zkušebních těles. Prostřednictvím tohoto poděkování bych také chtěl poděkovat své rodině a nejbližším, za podporu při zpracovávání bakalářské práce.

V Brně dne 25. 5. 2017

---

Libor Urbánek  
autor práce

## OBSAH

1	ÚVOD.....	- 10 -
2	PROVZDUŠNĚNÉ BETONY .....	- 11 -
2.1	Provzdušňovací přísady .....	- 13 -
2.1.1	Kompatibilita provzdušňovacích přísad .....	- 15 -
2.1.2	Vliv provzdušňovacích přísad na trvanlivost betonu.....	- 16 -
2.1.3	Vliv provzdušňovacích přísad na vlastnosti čerstvého betonu -	18 -
2.2	Složení provzdušněného betonu a jeho zpracování .....	- 18 -
2.3	Ukládání čerstvého provzdušněného betonu .....	- 19 -
2.4	Průkazní zkouška .....	- 19 -
3	PÓROVITOST BETONU.....	- 20 -
3.1	Druhy pórů v betonu .....	- 20 -
4	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI BETONU .....	- 21 -
4.1	Cement .....	- 21 -
4.1.1	Hydratace cementu .....	- 22 -
4.2	Kamenivo.....	- 24 -
4.2.1	Vlastnosti kameniva.....	- 24 -
5	PARAMETRY PROVZDUŠNĚNÍ ČERSTVÉHO BETONU.....	- 29 -
5.1	Metody stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu.....	- 29 -
5.2	Prostorové rozložení vzduchových pórů v čerstvém betonu...-	30 -
5.3	Stanovení obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu .....	- 33 -
5.3.1	Součinitel prostorového rozložení pórů ve ztvrdlém betonu...-	33 -
5.4	Srovnání Spacing factoru v čerstvém a ztvrdlém betonu .....	- 34 -
6	ZKOUŠKY VLASTNOSTÍ PROVZDUŠNĚNÉHO BETONU .....	- 39 -
6.1	Čerstvý provzdušněný beton.....	- 39 -
6.2	Ztvrdlý provzdušněný beton.....	- 40 -
6.3	Parametry betonů dle ČSN EN 206 a ČSN P 73 2404 .....	- 43 -
7	CÍL PRÁCE.....	- 45 -
8	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	- 46 -
8.1	Metodika práce .....	- 47 -
8.2	Charakteristika vstupních surovin .....	- 48 -
8.2.1	Cement.....	- 48 -
8.2.2	Kamenivo .....	- 48 -
8.2.3	Přísady.....	- 55 -
8.3	Přehled vyrobených zkušebních těles .....	- 55 -
8.4	Způsob uložení zkušebních těles .....	- 56 -



8.5	Složení betonu .....	- 56 -
9	VÝSLEDKY ZKOUŠEK .....	- 57 -
10	ZÁVĚR .....	- 67 -
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	- 70 -
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	- 72 -
13	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	- 73 -
14	SEZNAM GRAFŮ.....	- 74 -
15	SEZNAM TABULEK.....	- 74 -
16	SEZNAM PŘÍLOH .....	- 75 -
17	PŘÍLOHY .....	- 76 -

# 1 ÚVOD

Stavebnictví je obor hospodářství, jenž zajišťuje výstavbu, modernizaci, rekonstrukci a demolici stavebních objektů. Cílem stavebnictví je vytváření pracovního a životního prostředí pro existenci lidí, zvířat a rostlin a zároveň zachování přírodních a kulturních památek. Stavebnictví je velmi komplexní obor lidské činnosti, zahrnující v sobě nejenom složky technické, technologické a ekonomické, ale i estetické a ekologické.

Beton je kompozitní materiál ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, který vznikne ztvrdnutím cementové kaše (cementu a vody). Kromě těchto základních složek může obsahovat přísady a příměsi. Pokud je maximální frakce kameniva 4 mm nebo menší, používá se pro tento kompozitní materiál termín cementová malta.

Beton není ve stavebnictví žádnou novinkou. Při pátrání po jeho kořenech je potřeba se ohlédnout daleko do historie. Cement, jedna ze základních složek betonu, která pojí dohromady ostatní složky, byl objeven v Římě. Moderní beton, jak ho známe dnes, vznikl v první polovině 19. století (portlandský cement byl patentován v roce 1824) a od přelomu 19. a 20. století se používá zcela běžně ve stavebnictví.

Ve stavebnictví je beton jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů. Vedle požadavků na vysoké pevnosti a odolnosti stavebních konstrukcí splňuje i celou řadu jiných vlastností, kterých lze docílit použitím různých druhů betonů. Mezi ně se řadí mimo jiné i provzdušněné betony.

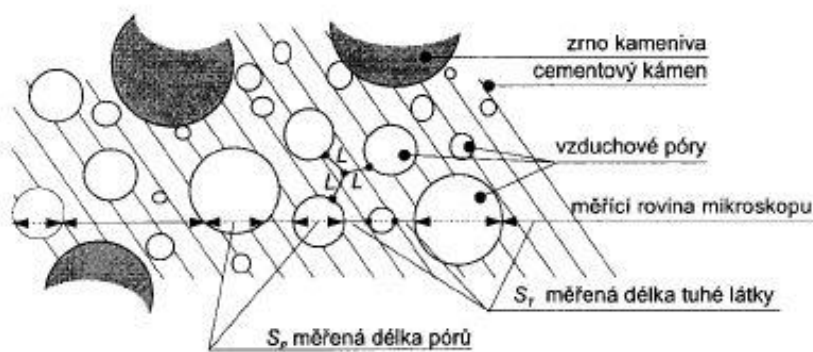
Provzdušněný beton je charakterizován výskytem mikroskopických vzduchových bublinek, které jsou vytvořeny v čerstvém betonu při míchání pomocí vhodných chemických přísad. Provzdušněné betony nacházejí uplatnění v prostředí, kde je beton vystaven účinkům působení zmrazování a rozmrazování bez nebo s rozmrazovacími prostředky. Dochází k rozpínání vodních kapiček v betonu a vzduchové bublinky vytvořené záměrně, snižují tlak, který tyto vodní kapičky vytváří na beton. Objem vzniklého ledu je zhruba o 9 % větší než objem vody. Tlak v betonu působí všemi směry. Chemické přísady, používané pro vytvoření vzduchových pórů v betonu se nazývají provzdušňovací přísady. Množství provzdušňovací přísady se mění v závislosti na požadovaných výsledných vlastnostech betonu, avšak nejčastěji je mezi 0,05 – 0,5 % z množství cementu v betonu. [1] [2]

## 2 PROVZDUŠNĚNÉ BETONY

Provzdušněné betony se využívají jako betony, odolné vůči působení mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich. Ve velké míře se používají u konstrukcí dopravních staveb. Zamrzání vody v pórech betonu způsobuje napětí ve vnitřní struktuře betonu, jehož následkem je vznik trhlin. Provzdušněný beton se také používá na betonové přehradní zdi, vnější schodiště a rampy, hlavy nábrežních zdí, parkovací garáže a vjezdy, atd. [3] [4]

Provzdušňující přísady, které dávkuje do čerstvého betonu při míchání, vytvářejí svojí aktivací malé póry o velikosti 10 – 300  $\mu\text{m}$ . Tyto póry slouží ve ztvrdlém betonu jako volný prostor, ve kterém se může uvolnit expandující led o větším objemu, vznikající za záporných teplot z vody nasáklé do betonu.

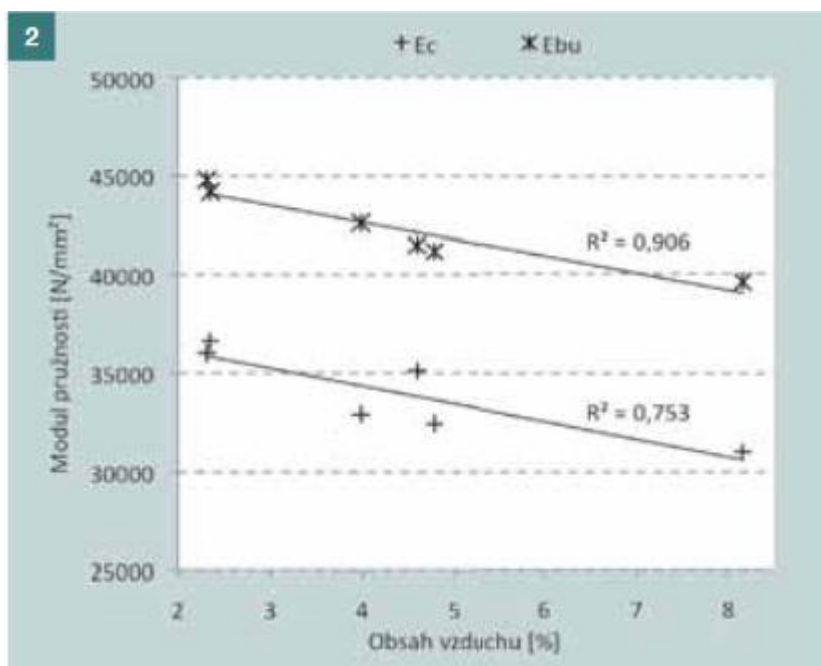
Běžně zhuťněný beton, ve kterém nebyla použita provzdušňovací přísada, obsahuje 1 – 2 % pórů. Při použití provzdušňujících přísad účelně zvyšujeme provzdušnění betonu v čerstvém stavu cca na 4 – 6 % objemu betonu. Obsah účinných pórů, tj. pórů menších než 300  $\mu\text{m}$ , je cca 2 až 3 % s požadovanou vzdáleností jednotlivých pórů, které charakterizuje tzv. Spacing factor AF (součinitel prostorového rozložení L [mm]). Spacing factor má být menší nebo roven 0,200 mm. Čím je Spacing factor menší, tím je beton proti působení agresivního prostředí odolnější. [6]



Obr. č. 2.1 – Schéma měření pórů pro stanovení součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů L [mm] [6]

Pevnost provzdušněného betonu v tlaku klesá se stupněm provzdušnění asi o 2 - 3 % na každé 1 % provzdušnění, avšak nesmí klesnout pevnost zmrazovaného betonu pod 75 % pevnosti v tahu za ohybu referenčního betonu po 28 dní zrání. Je tedy zřejmé, že s rostoucím obsahem vzduchu ve ztvrdlém

betonu klesá nejen pevnost v tlaku, v tahu za ohybu, ale i modul pružnosti – jak statický, tak dynamický. [22]



Obr. č. 2.2 – Závislost modulu pružnosti na obsahu vzduchu v betonu [22]

Obsah záměrně vneseného vzduchu do betonu by měl dosahovat hodnoty celkového obsahu vzduchu v betonu  $A \geq 4 \%$ . Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů  $L$  by měl být  $\leq 0,200$  mm. Součinitel prostorového rozložení pórů  $L$  je vypočítaný parametr, který nám udává maximální vzdálenost jakéhokoliv bodu v cementovém tmelu od okraje vzduchového póru.

Pro návrh provzdušněného betonu musíme zvážit, že obsah vzduchu v betonu při použití provzdušňovací přísady, by měl být 4 – 6 % z celkového objemu betonu. Neprovzdušněný beton obsahuje 1 – 2 % vzduchu v betonu. Objem kulovitých pórů a jejich velikost ovlivňují tyto parametry:

- druh a množství provzdušňovací přísady, ta se dávkuje jen ve velmi malém množství (0,05 až 0,5) % hmotnosti cementu a v čerstvém betonu se musí docílit provzdušnění cca (4-6) % objemu,
- druh, jemnost mletí a množství cementu; čím jemnější cement a čím více obsahuje strusky, tím je třeba větší dávky přísady pro stejné množství vzduchových pórů,
- vodní součinitel  $w$ , s jeho zvětšením se zvětšuje velikost pórů,
- granulometrie kameniva, zvýšením podílu zrn (0-0,25) mm se zvyšuje obsah pórů i při stejné dávce přísady a stejné konzistenci,

- potřebné množství pórů se snižuje se zvětšujícím se maximálním zrnem kameniva, dle ČSN EN 206 se požaduje provzdušnění min 4 %,
- intenzivní vibrací se část pórů vytěsňuje,
- pevnost betonu v tlaku klesá se stupněm provzdušnění asi o 2 - 3 % na každé 1 % provzdušnění.

Provzdušňovací přísada působí často plastifikačně, na 1 % pórů se snižuje množství vody asi o 2 % při stejné zpracovatelnosti. [6]

## 2.1 Provzdušňovací přísady

Provzdušňující přísady jsou látky, které během míchání čerstvého betonu vytvářejí uzavřené vzduchové póry rovnoměrně rozložené v betonu. Již před mnoha lety se zjistilo, že betony obsahující jemně rozptýlené vzduchové póry lépe odolávají působení mrazu a agresivitě mořské vody. Tyto póry mění pórovitou strukturu cementového kamene, porušují síť kapilár. Vzduch uzavřený v pórech zlepšuje chování betonu proti účinkům ledu vznikajícího mrznutím vody v kapilárách i proti růstu krystalů chemických solí (rozmrazovacích solí, mořská voda). Provzdušněním vytvořené vzduchové póry jsou expanzí prostorem pro zvětšující se objem krystalů ledu a solí, póry snižují hydrostatický tlak v pórovité struktuře. Objem ledu je cca o 9 % větší než objem vody v kapalném skupenství. Kritériem účinnosti provzdušňovací přísady na trvanlivost betonu je vzdálenost pórů od sebe navzájem, označovaná jako součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů  $L$  – Spacing factor (obr. 2.1), který by měl být menší než 0,200 mm a požadovaná velikost vytvořených pórů bývá o průměru 25 až 300  $\mu\text{m}$  (celý rozsah pórů je od 10  $\mu\text{m}$  do 2 mm). Větší vzduchové póry nebo kapiláry snižují trvanlivost, podobně i větší vzdálenosti mezi póry. Na obr. 2.2.1 je uvedeno normální rozdělení vzdálenosti mezi jednotlivými provzdušňovacími póry (plná čára) a současně rozdělení objemu pórů (čárkovaná čára). [5], [6]

Jako provzdušňující přísady se používají tenzidy, jako mýdla přírodních pryskyřic, syntetické neionogenní a anionogenní tenzidy (např. alkylpolyglykoléter, alkylarylpolyglykoléter, alkylsulfát) a sloučeniny:

- produkty na bázi přirozených pryskyřic (abietát sodný),
- soli mastných kyselin (většinou sodné soli, pěnicí mýdla),
- sulfonové deriváty organických kyselin (lignosulfonan Ca, Na),
- hydrolyzované albuminoidy a bílkoviny,

- etoxilované organické třísloviny,
- soli etanolaminu, které tvoří s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nerozpustné sloučeniny, zlepšují i melitelnost.

Provzdušnění vyvolávají i pěnotvorné přísady a některé plastifikační přísady. Odpěnění, pokud je žádoucí, se provádí nepatrnou dávkou (do 0,5 % hmotnosti přísady etanolu nebo tributylfosfátu nebo organo-křemičité sloučeniny. Odpěňovače jsou povrchově aktivní látky, přidané v nepatrném přebytku, takže lamela pěny ztratí svoji stabilitu. [6]

Provzdušňující přísady v betonu vytváří síť pórů, které lze definovat různými parametry. Například součinitelem prostorového rozložení pórů  $L$ .

Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů  $L$  [mm] se vypočítá z mikroskopické analýzy výbrusu betonu dle Rosiwala (ČSN 73 1311:1974). Dnes již tato metoda není využívána. Pro stanovení obsahu vzduchu a Spacing factoru se již používají novější metody. Rosiwalova metoda je zkušební postup pro stanovení objemů jednotlivých vizuálně rozlišitelných složek tuhé látky; spočívá v postupném sčítání úsečků, ve kterých protíná přímka soustavu pravidelně rozmístěných přímek, vedených po povrchu vzorku v jednom nebo více směrech, přičemž se počítají jednotlivé složky tuhé látky, v našem případě vzduchové póry. Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů  $L$  se vypočítá z podmínek:

$$\frac{V_{CK}}{V_Z} < 4,33 \text{ platí } L = \frac{V_{CK}}{40 \cdot n} \quad [\text{mm}]$$

$$\frac{V_{CK}}{V_Z} > 4,33 \text{ platí } L = \frac{1,4 \cdot 30}{\alpha} \cdot \sqrt[3]{\frac{V_{CK}}{V_Z} + 1} - 1 \quad [\text{mm}]$$

$$\text{parametr } \alpha = \frac{400 \cdot n}{V_Z \cdot (S_T + S_P)}; \quad V_{CK} = 0,032 \cdot m_c + 0,1 \cdot m_v$$

kde

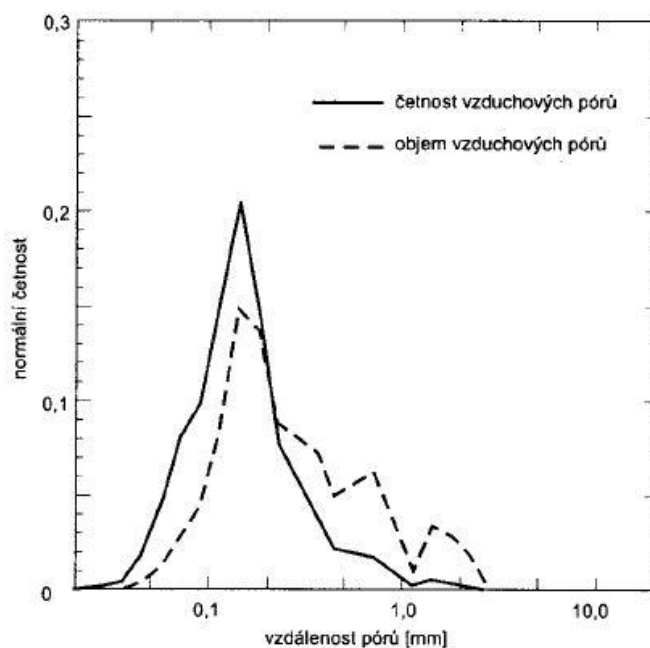
$n$  - počet měřených pórů,

$V_{CK}$  - objem cementového kamene v  $\text{m}^3$ ,

$m_c, m_v$  - množství cementu a vody v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  betonu,

$V_Z$  - objem vzduchových pórů v  $\text{m}^3$  na  $1 \text{ m}^3$  betonu,

$S_T, S_P$  - součet měřených délek



*Obr. 2.2.1 – Rozdělení velikosti pórů a vzdálenost mezi nimi v provzdušněném betonu (Roberts, Schmeier)[6]*

Podstata zkoušky stanovení vzduchových pórů dle ČSN EN 480 – 11 je založena na mikroskopickém snímání podél řady měřících přímk, vedených rovnoběžně s původním horním povrchem vzorku. Počet vzduchových pórů protnutých měřícími přímkami se zaznamená, stejně tak jako jednotlivé délky tětív. Matematická analýza dat poté umožňuje popis systému vzduchových pórů z hlediska požadovaných výstupů. [6]

### **2.1.1 Kompatibilita provzdušňovacích přísad**

Po stránce chemické jsou provzdušňovací přísady tvořeny solemi přírodních pryskyřičných a mastných kyselin nebo syntetickými tenzidy.

Při jejich přípravě je možné vycházet z kalafuny nebo z talového oleje vznikajícího při sulfátovém zpracování celulózy. Takto připravená provzdušňující činidla obsahují soli kyseliny abietoé a pimarové spolu s dalšími látkami fenolického charakteru. Dodávají se ve formě roztoku obsahujícího 5 až 20 % výše uvedených solí.

Stálejší provzdušňovací přísady, připravované například z kokosového oleje, obsahují sodné nebo draselné soli kyseliny olejové a kaprinové. K jejich výhodám patří kompatibilita s lignosulfonáty a solemi hydroxykarboxylových kyselin, což umožňuje přípravu aditiv s kombinovaným plastifikačně - provzdušňujícím účinkem.

Kombinovaný provzdušňující a plastifikační účinek vykazují syntetické sulfonované tenzidy (dodecylsulfonan sodný, cetylsulfonan sodný, dodecylbenzensulfonan sodný).

Intenzivní provzdušňující účinek mají neionogenní tenzidy typu etoxylovaných fenolů, zejména etoxylovaný nonylfenol.

K provzdušnění betonu se vyrábějí také mikrodutinky, což jsou duté tenkostěnné polymerní granulky o velikosti 0,02 až 0,08 mm přidávané do betonu ve formě vodní pasty. Při dávce 1 až 3,5 kg na 1 m<sup>3</sup> betonu vytvářejí dostatečně hustý systém pórů (součinitel prostorového rozložení je menší než 0,150 mm). Za výhodu mikrodutinek lze považovat zaručenou velikost vytvářených pórů. [23]

### **2.1.2 Vliv provzdušňovacích přísad na trvanlivost betonu**

Jak již bylo zmíněno výše, provzdušňovací přísady vytvářejí v čerstvém betonu stabilní uzavřené vzduchové póry, které zůstávají v betonu i po jeho zatvrdnutí. Optimální průměr vzniklých vzduchových bublin je 0,025 – 0,300 mm. Vzduchové póry v betonu mění strukturu cementového kamene a výrazně ovlivňují trvanlivost betonu. Vlivem rozptýlených bublin dochází k rozrušování sítě kapilár. Vzduch uzavřený v dutinách zlepšuje odolnost betonu proti účinkům mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími látkami nebo bez nich. [5]

Vytvoření vzduchových pórů ideální velikosti je závislé na několika faktorech. Jedná se zejména o velikost vodního součinitele, zpracovatelnost, obsahu jemných podílů v kamenivu, dávka a druh cementu, kvalita a čistota vody, teplota, doba vibrace, dávka provzdušňovací přísady a její způsob dávkování. [33]

Ionty obsažené v záměsové vodě mohou mít buď pozitivní, nebo negativní vliv na pěnivost, povrchovou aktivitu nebo migraci vzduchových pórů v čerstvém betonu. Vlastnosti záměsové vody jsou nestálé, kvůli měnící se koncentraci rozpuštěných látek. Ve vodě mohou být rozpuštěny kationty ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) a anionty ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ). [33]

Odolnost betonu je potřeba zvýšit vůči účinkům ledu, který vzniká v kapilárách cementového kamene z důvodu fázové přeměny vody z kapalného na pevné skupenství. Tato fázová přeměna je doprovázena s nárůstem objemu o cca 9 %. Při zmrazování a rozmrazování doplněné o výskyt rozmrazovacích



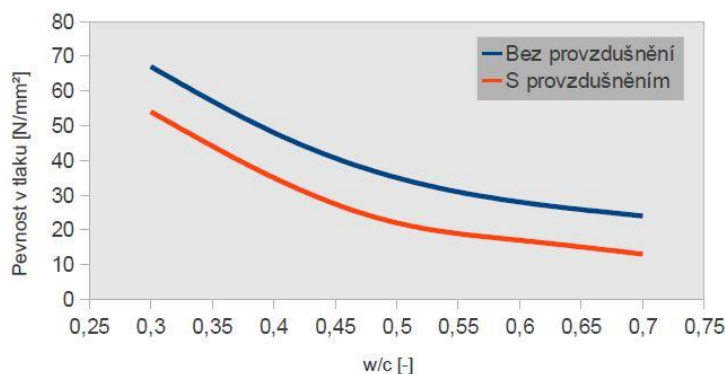
prostředků je potřeba zvýšit odolnost betonu proti růstu krystalů a chemických solí. Při použití provzdušňovacích přísad dochází k jevu, kde díky působení hydrofobního účinku zůstávají póry zaplněny vzduchem. Pro eliminaci vzniku trhlin vlivem tlaku se využívají uměle vnesené vzduchové póry, které slouží jako pomyslný úložný prostor pro expandující led, který zvyšuje svůj objem.[33]

Odpovídající provzdušnění betonu je obranou proti vnitřnímu zmrazování v případě, že led se začne tvořit ve vzduchových pórech a bude stlačovat okolní matici. Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů vyjadřuje vzdálenost, při které většina hmoty uvedená hodnotou součinitele prostorového rozložení pórů bude stlačována od vnitřního zmrazování. [34]

Obdobný účinek mají provzdušňovací přísady na zlepšení mrazuvzdornosti betonu. Princip je stejný. Vzduchové póry vytváří ve ztvrdlém betonu prostor pro rozpínání ledu a tím snižování napětí v cementovém kameni.

Vyšší obsah vzduchu ve ztvrdlém betonu snižuje pevnost cementového kamene zvyšováním jeho pórovitosti, tím pádem bude snížena i soudržnost mezi cementovým kamenem a kostrou betonu, tedy kamenivem. Tento vliv provzdušňovacích přísad je redukován přidavkem plastifikačních přísad. Dochází ke snížení vodního součinitele, tudíž ke zvýšení pevnosti betonu, jak lze pozorovat na obrázku č. 2.1.2.1.

Vnesením pórů do struktury cementového kamene se sníží pevnost betonu v tlaku až o 20 % oproti referenčnímu betonu bez vneseného provzdušnění. Je zřejmé, že s rostoucím obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu klesá pevnost v tlaku. [9]



Obr. 2.1.2.1 – Vliv obsahu vzduchu na pevnost v tlaku betonu [9]

### **2.1.3 Vliv provzdušňovacích přísad na vlastnosti čerstvého betonu**

Provzdušňovací přísady mají v čerstvém betonu vliv na jeho zpracovatelnost, kterou zlepšují. Dále zlepšují čerpatelnost a stabilitu čerstvého betonu. Dále také zamezují bleedingu .

Provzdušňovací přísady připravované na bázi kokosového oleje, které mají i plastifikační účinek, mají pozitivnější vliv na pevnost betonu v tlaku, než například při použití přísad na bázi tenzidů. Díky plastifikačnímu účinku může být sníženo množství záměsové vody, v kombinaci s vhodnou plastifikační přísadou, tudíž zachování zpracovatelnosti, při použití menšího množství záměsové vody.

Syntetické sulfonované tenzidy mají podobný účinek, jako provzdušňovací přísady vyráběné na bázi kokosového oleje.

Jak již bylo řečeno, provzdušňovací přísady mají z části plastifikační účinek. Plastifikační přísady se dělí na plastifikační a superplastifikační dle schopnosti redukce záměsové vody při zachování stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu.

## **2.2 Složení provzdušněného betonu a jeho zpracování**

Důležitým faktorem pro provzdušněné betony je obsah jemných podílů, aby nedocházelo k případnému odměšování záměsové vody. Nesmí však být překročena horní hranice. Obsah jemných podílů (0,25 až 1,0 mm) ulehčuje tvorbu vzduchových pórů. Negativní vliv na tvorbu vzduchových pórů má výskyt jílových podílů a příměsí. Pro vodu platí stejné požadavky jako pro jakýkoliv jiný beton. Používá se zejména voda z vodovodní sítě. Nedoporučuje se používat vodu získanou z recyklací čerstvých betonů, tzv. kalovou vodu. Provzdušněný beton se normálně vyrábí v konzistencích S 1 až S 3, měkčí konzistence způsobují zhoršení charakteristik a zvyšují rozptyl hodnot. [7]

Výrobu provzdušněných betonů se doporučuje provádět ve stabilních betonárnách. Tvorba mikropórů je silně odvislá od okamžiku dávkování provzdušňovací přísady, doby a účinku míchání a teploty. Příklad dávkujeme spolu se záměsovou vodou, nejlépe s posledním dílem vody (1/3 množství záměsové vody) do již smočených ostatních složek. Doba míchání musí činit alespoň 45 sekund. Zvolená doba míchání se udržuje konstantní během celé

výroby. Nízké teploty mají za následek nižší provzdušnění, proto se musí dávkovat větší množství přísady. Při 0 °C (u tenkých konstrukcí již při + 5 °C) se nesmí dál provádět betonáže provzdušněných betonů. Vyrobený provzdušněný beton je třeba zpracovat do 90 minut. Přepravuje se za sníženého počtu otáček, před vyprázdněním se nejméně 1 minutu rychleji promíchá. Se vzrůstající teplotou vyráběného betonu se většinou silně zvyšuje obsah vzduchu v čerstvém betonu. [7]

## **2.3 Ukládání čerstvého provzdušněného betonu**

Pokud je provzdušněný beton přepravován čerpadlem, odebírají se zkušební vzorky na stanovení provzdušnění až za ústím čerpadla. Při čerpání se na vzdálenost cca 30 metrů snižuje obsah vzduchu za pumpou o 1 až 1,3 %. Při dodávání čerstvého betonu musí být dodrženy uvedené časy (max. 90 minut). Dodávaná konzistence musí odpovídat zhutňovacím prostředkům na staveništi. Doba vibrace a její účinnost musí být odpovídající provzdušnění betonu. Z toho důvodu se omezuje tloušťka ukládaných vrstev na 0,40 m.

Jako odbedňovací přípravky smějí být použity pouze prvky, které jsou deklarované pro provzdušněný beton. Nanášejí se v co nejmenší vrstvě, aby vznikl pouze rovnoměrný film, a to s ohledem na technické parametry odbedňovacího prostředku.

Nebedněné vodorovné plochy nelze ihned stahovat a hladit, aby nedošlo k poškození vzduchových pórů v horní části struktury. [8]

## **2.4 Průkazní zkouška**

Pro deklaraci vlastností čerstvého betonu se používá průkazní zkouška, která má za cíl ověřit požadované vlastnosti betonu před zahájením výroby, kterých by měl čerstvý beton dosáhnout. Jedná se zejména o tyto parametry:

- minimální množství vzduchu v čerstvém betonu,
- stabilitu vzduchových pórů – např. při konzistenci F1 340 mm nesmí dojít k poklesu o více než 1 %,
- doba míchání po nadávkování provzdušňovací přísady nejméně 45 s,
- konzistence se upravuje tak, aby odpovídala konzistenci při předání,
- teplota,
- přepravní doba a doba zpracování.

Dávka provzdušňovací přísady, doba míchání, intenzita míchání, přepravní doba, teplota se musí plynule upravovat podle daných podmínek. Pozornost je třeba věnovat i funkci zkušebního zařízení. [8]

## 3 PÓROVITOST BETONU

### 3.1 Druhy pórů v betonu

Beton, který se ve stavebnictví běžně používá, je pórovitým materiálem. Jako u všech ostatních materiálů i v jeho případě pórovitost zásadním způsobem ovlivňuje jeho pevnost, modul pružnosti, permeabilitu a trvanlivost. Póry v betonu mohou být rozděleny do pěti různých druhů:

- A. Póry, které vznikají v důsledku nedokonalého zhutnění čerstvého betonu a následného nedokonalého vypuzení zachyceného vzduchu z betonu. Následkem jsou nepravidelné makrodutiny (kaverny), které jsou v nedokonale zhutněném betonu hojně zastoupeny.
- B. Póry, které jsou přítomny v zrnech kameniva, jako například v lehkém kamenivu. Důsledkem je růst tepelně izolačních vlastností betonu, ale také pokles jeho mechanických vlastností.
- C. Pórovitost ve formě provzdušnění, tedy sférických uzavřených pórů velikosti 100 – 300  $\mu\text{m}$ , které lze pozorovat optickým mikroskopem. Tyto póry jsou důsledkem záměrného použití provzdušňovacích přísad z důvodu výroby betonu odolného vůči působení účinků mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich.
- D. Póry, které vznikají mezi zrny hydratujícího cementu. Mají nepravidelný tvar a velikost od 0,1 do 10  $\mu\text{m}$ , které lze sledovat optickým mikroskopem. Tyto póry jsou nazývány také kapilární póry. Výskyt těchto pórů je závislý na vodním součiniteli a na způsobu ošetřování betonu.
- E. Póry, které se vyskytují uvnitř pevných hydrátů, zejména v C-S-H (tobermoritickém) gelu. Tyto póry se označují jako gelové póry a jedná se o nanopóry (velikosti 1 – 10 nm). Tyto póry se nedají pozorovat ani elektronovým mikroskopem, ale jsou zjišťovány nepřímou, prostřednictvím adsorpce plynů: dusíku, hélia nebo vodní páry.

[8]

## **4 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI BETONU**

Nehledě na to, jak byl beton vyroben, zda jako transportbeton nebo prefabrikát, je ztvrdlý beton konstrukčním materiálem, z něhož jsou tvořeny konstrukční prvky (trámce, průvlaky, sloupy, stěny, stropy, podlahy, ...), které jsou během své živostnosti vystaveny mechanickému napětí, statickému nebo dynamickému a různým vlivům okolního prostředí. Prostý beton sestává z jemného kameniva a hrubého kameniva, která jsou rozptýlena v pevné matici (ztvrdlé cementové pastě neboli cementovém kameni). Ta pojí zrna dohromady, přičemž vzniká kompozitní materiál. [8]

I když jsou zvoleny přesně složky a jejich poměry, aby mohl být vyroben co nejlepší beton, hotová konstrukce nemusí splňovat očekávání, zejména co se týká pevnosti a trvanlivosti. Péče musí být věnována každé jednotlivé fázi betonáže: míchání, dopravě betonu, jeho ukládání, zhutňování, odformování a zejména ošetřování, což znamená udržet konstrukci ve vlhkém prostředí po nezbytnou dobu (3 – 7 dní) po odformování. Pokud není beton adekvátně ošetřován, dochází k porušení betonu tvorbou trhlin, které výrazně snižují jeho trvanlivost. [8]

### **4.1 Cement**

Beton nelze vyrobit bez kterékoliv ze základních složek – cementu, vody a kameniva. Je ovšem pravda, že duší betonu je cement. Cement je anorganický materiál, který po smíchání s vodou (o vodním součiniteli cementové kaše (cca 0,3 – záleží na druhu cementu)), tuhne a tvrdne i pod vodou. Během několika dní získává vlastnosti podobné přírodnímu kameni. Cement lze z části nahradit například pucolány, struskou, elektrárenským popílkem, nebo křemičitými úlety. [10]

Tab č. 4.1.1 Přehled hlavních složek cementářského slínku [23]

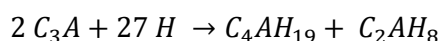
Název	Vzorec	Slovní označení	Obsah (%)	Hydratační teplo (kJ·kg <sup>-1</sup> )	Hydratace	Odolnost vůči agresivitě
trikalciumsilikát	C <sub>3</sub> S	alit	35 - 75	500	rychlá	nízká
Dikalciumsilikát	C <sub>2</sub> S	belit	5 - 40	250	střední	vyšší
Tetrakalciumaluminátferit	C <sub>4</sub> AF	brown-millerit	9 - 14	420	rychlá	<b>největší</b>
Trikalciumaluminát	C <sub>3</sub> A	amorfní fáze	3 - 15	910	velmi rychlá	nízká
Oxid vápenatý	CaO	volné vápno	< 4	1160	pomalá	-
Oxid hořečnatý	MgO	periklas	< 6	-	pomalá	-

Z výše uvedené tabulky je zřejmé, že cementy s vyšším obsahem brown-milleritu jsou nejvíce odolné vůči působení agresivního prostředí. Naopak cementy alitické a s vyšším obsahem trikalciumaluminátu jsou méně odolné vůči působení agresivního prostředí.

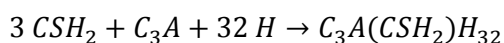
#### 4.1.1 Hydratace cementu

Z hlediska mineralogického složení cementu se cement liší svými vlastnostmi, vhodnými oblastmi použití, a také odolností vůči chemicky agresivnímu prostředí. Alitické cementy dosahují vysokých konečných i počátečních pevností. Vykazují vysokou hydratační rychlost a vysoký vývin hydratačního tepla. Při hydrataci alitu se uvolňují 3 moly Ca (OH)<sub>2</sub>, což má za následek nízkou odolnost proti působení síranových vod, kdy vzniká sekundární ettringit (tento minerál se vyznačuje nárůstem objemu až na 270 % původního objemu). Belitické cementy se vyznačují poměrně dobrými dlouhodobými pevnostmi, ale nízkými počátečními pevnostmi. Hydratace je pozvolná, a vývin hydratačního tepla je nízký. Hodí se pro betonování masivních konstrukcí. Cementy s vyšším obsahem trikalciumaluminátu se vyznačují nízkou odolností vůči agresivnímu chemickému působení, nehodí se pro betonování masivních konstrukcí. Cementy celitické jsou nejodolnější vůči chemicky agresivním látkám, proto je snaha o zvýšení podílu celitu v síranovzdorných cementech.

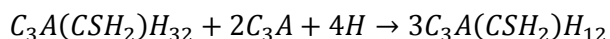
Hydratační reakce trikalciumaluminátu vede ke tvorbě nerozpustných hydroaluminátů, je příliš rychlá. První krok lze zapsat takto:



Pokud je ve směsi volný sádrovec, dochází přednostně k tvorbě komplexního trisulfátu (ettringitu), enormně bohatého na krystalovou vodu:



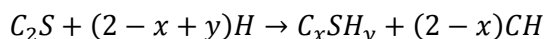
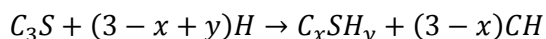
Po spotřebování sádrovce vytváří ettringit s přebytkovým trikalciualuminátem komplexní hydratovaný monosulfát:



Zpomalující účinek sádrovce spočívá v tom, že se na povrch zrn trikalciualuminátu okamžitě vytváří jemně krystalický povlak trisulfátu, který však neomezuje pohyblivost zrn a neovlivňuje zpracovatelnost. Tento povlak zabraňuje další hydratační reakci trikalciualuminátového zrna.

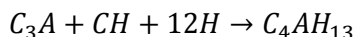
Podobná reakce sádrovce s  $C_4AF$  je také možná, probíhá však daleko pomaleji. Hydratace dikalciumaluminátu a trikalciumsilikátu vede navzdory rozdílnému průběhu k prakticky stejným produktům – hydratovaným křemičitanům vápenatým.

Trikalciumsilikát i dikalciumsilikát se během hydratace rozkládají a uvolňují hydroxid vápenatý, který se v cementářské notaci zapisuje jako CH. Celý jev lze popsat pomocí rovnic:



Při hodnotách  $x = 0,5 - 1,5$  a hodnotách  $y = 0,5 - 2,5$  popisují výše uvedené rovnice vznik mineralogické fáze C-S-H (I) vytvářející lístkovitou strukturu. Při  $x = 1,5 - 2$  a  $y = 1,0 - 4,0$  je výsledné složení charakteristické pro fázi C-S-H (III), která má podobu tenkých dutých svazčitých vláken.

Množství hydratací uvolněného hydroxidu vápenatého je poměrně značné. Ze 100 kg portlandského cementu se při hydrataci uvolní asi 30 kg  $CaO$  ( $OH$ )<sub>2</sub>. Jen malá část uvolněného hydroxidu vápenatého se může spotřebovat na tvorbu aluminhydrátu, například dle rovnice:



Nárůst pevností hydratujícího cementu je dán chemickým složením a jemností mletí cementu. Jemnější cementy tvrdnou rychleji. Speciální rychletuhnoucí cementy se proto melou až na 500 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>. Dosažení takové jemnosti mletí je však energeticky náročné. Tvrdnutí cementu probíhá nejintenzivněji během prvního týdne, později se zpomaluje. Dotvrzování

cementu sice probíhá po několik let, avšak z praktického hlediska považujeme hodnotu pevnosti dosaženou při teplotě 20 °C po 28 dnech zrání za hodnotu konečnou. Po této době se určuje třída cementu dle ČSN EN 196 – 1 a rovněž pevnostní třída betonu dle ČSN EN 206. [23]

Pro provzdušněné betony jsou nejvhodnější cementy portlandské a portlandské směsné s příměsí strusky.

## **4.2 Kamenivo**

Kamenivo je zrnitý materiál, který je obvykle chemicky neaktivní. Zrna kameniva jsou rozptýlena v cementové matici hlavně, protože kamenivo tvoří nosnou kostru betonu. Představuje dvě třetiny až tři čtvrtiny jeho objemu, propůjčuje betonu lepší objemovou stabilitu a lepší trvanlivost. Kamenivo hraje velkou roli také z hlediska pevnosti betonu, zejména u vysokohodnotných betonů.

Kamenivo je složeno z množství samostatných zrn. Pokud jsou zrna kameniva menší než 4 mm, označujeme takové kamenivo jako drobné, pokud jsou zrna větší, mluvíme o hrubém kamenivu. Známe dva základní typy hrubého kameniva – štěrk (těžen z řek nebo kopaný v pískovnách), a drť (vzniká drcením hornin). Termínem „kamenivo“ označujeme oba typy, jak jemné kamenivo, tak hrubé kamenivo.

Dalším důležitým znakem kameniva jsou vnitřní póry v jednotlivých zrnech. Pórovitost kameniva ovlivňuje absorpci vody a také zpracovatelnost čerstvého betonu, pevnost betonu a jeho mrazuvzdornost. [9]

Pro provzdušněné betony je důležitý obsah jemných podílů od 0,25 do 1 mm. Tvorba vzduchových pórů je snazší při výskytu jemných podílů. Jemné podíly obsažené v kamenivu jsou důležité k zadržení záměsové vody, aby nedocházelo k bleedingu. Kamenivo drobné je ideální použít prané těžené, hrubé kamenivo je nejlepší těžené, popřípadě i drcené bez znečišťujících látek (odprašky, fillery).

### **4.2.1 Vlastnosti kameniva**

#### **4.2.1.1 Objemová hmotnost zrn kameniva**

Objemová hmotnost zrn kameniva je poměr hmotnosti zrn vzorku kameniva k objemu, který vzorek zaujímá včetně dutin a pórů v jednotlivých zrnech, avšak bez mezer mezi zrny. Nezávisí na velikosti zrn.



Dělíme kamenivo do skupin:

- těžké kamenivo – o objemové hmotnosti větší než  $3\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,
- hutné kamenivo – o objemové hmotnosti v rozmezí od  $2\,000$  do  $3\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,
- pórovité kamenivo – o objemové hmotnosti ne větší než  $2\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , nebo sypané hmotnosti ne větší než  $1\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

[23]

#### **4.2.1.2 Zrnitost kameniva**

Frakce je množina zrn kameniva, které propadnou horním sítím (horní mez frakce) a zachytí se na spodním sítu (dolní mez frakce). Frakce se zapisuje ve formě d/D. Pokud je poměr d/D větší než 2, potom je těmito sítí definovaná široká frakce. Pokud je poměr d/D menší nebo roven 2, je tato frakce nazývána úzká. [29]

#### **4.2.1.3 Tvar zrn kameniva**

U hrubého kameniva se kromě zrnitosti hodnotí také tvar jednotlivých zrn. Tvar zrn má zásadní vliv na zpracovatelnost betonových směsí a v případě hutněných vrstev má vliv na pevnost výsledného kompozitu.

Důležitý je tvar jednotlivých zrn. Zrna mohou být kulovitá, krychlová, plochá, podlouhlá nebo jehlicovitá. Číselnou charakteristiku zrn hrubého kameniva reprezentuje tvarový index.

Tvarový index SI je definován jako hmotnostní podíl zrn, jejichž poměr největšího a nejmenšího rozměru L/E je větší než 3. Vyjadřuje se v procentech celkové hmotnosti zkoušených zrn. Zrna, která mají rozměrový součinitel  $L/E > 3$ , jsou klasifikována jako zrna nekubického formátu a jsou pro betonářské účely považována za tvarově nevhodná. Pro kulovitá a krychlovitá zrna se rozměrový součinitel blíží 1. Taková zrna jsou pro betonářské účely nejvhodnější. [23]

#### **4.2.1.4 Obsah schránek živočichů**

Podíl schránek živočichů nesmí v hrubém kamenivu přesáhnout 10 procent hmotnostních. Zjišťuje se podle ČSN EN 933 – 7 pro hrubé kamenivo a směsi, které kamenivo hrubé obsahují. [23]

#### 4.2.1.5 Požadavky na fyzikální vlastnosti

Ověřuje se náchylnost kameniva k poškození vlivem zmrazování a rozmrazování v závislosti na frekvenci zmrazovacích cyklů a stupni nasycení kameniva vodou. Riziko porušení se zvyšuje, je-li kamenivo vystaveno mořské vodě nebo působení účinkům chemických rozmrazovacích látek.

Požadavky na mrazuvzdornost kameniva do betonu určuje doplňková norma ČSN P 73 2404 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace, ve které se požadavky dělí dle požadované životnosti stavby. Kamenivo pro stavbu s očekávanou životností 50 let musí vyhovět mrazuvzdornosti dle ČSN EN 12620 + A1 Kamenivo, která se odkazuje na Normu EN 1367-1 Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání – Část 1 : Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování. Dle normy ČSN EN 12620 + A1 dělíme kamenivo dle ztráty hmotnosti po zkoušce zmrazování a rozmrazování do kategorií  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_4$ ,  $F_{\text{deklarovaná}}$  a  $F_{\text{NR}}$ .

Tab č. 4.2.1.5.1 – Kategorie pro maximální hodnoty odolnosti proti zmrazování a rozmrazování

Zmrazování a rozmrazování Procenta ztráty hmotnosti	Kategorie F
$\leq 1$	$F_1$
$\leq 2$	$F_2$
$\leq 4$	$F_4$
$> 4$	$F_{\text{deklarované}}$
Bez požadavku	$F_{\text{NR}}$

[35]

Pevnost zrn použitého kameniva musí být minimálně taková, jaká je požadovaná pevnost betonu. Pevnost kameniva usuzujeme dle známé pevnosti mateční horniny, ze které je kamenivo natěženo. Z mateční horniny se získá zkušební těleso, které je podrobena zkoušce v tlaku ve zkušebním lisu. Dle výsledku pevnosti mateční horniny se odlaďují další použité materiály a očekávané vlastnosti betonu. [30]

#### 4.2.1.6 Jíly a jemné částice

Jíly a další drobnozrnné materiály, jako bahno nebo prach zrcení, které se zachycují na povrchu zrn kameniva, mohou oslabovat vazbu mezi kamenivem a cementovou maticí. V takovém případě budou mechanické vlastnosti betonu horší, ale nenastane přímo nebezpečí degradace konstrukce. Proto nemůže být

považována přítomnost jemných částic za stejně nebezpečnou, jako je přítomnost chloridů, síranů nebo reaktivních složek, které mají na trvanlivost betonu zásadní vliv. Navíc mohou být jílovité nebo prachové částice z kameniva odstraněny praním a kamenivo pak získává lepší vlastnosti. [9]

#### **4.2.1.7 Alkalicko křemičitá reakce**

Některé formy křemene (ty, které jsou nedokonale krystalické) mohou reagovat s alkáliemi (sodíkem a draslíkem) z cementu a tvořit alkalicko-křemičité hydráty, které jsou rozpínavé a porušují okolní cementovou matici. Tato reakce, známá jako alkalicko-křemičitá reakce (alkali-silica reaction – ASR), se projevuje mozaikou nepravidelných trhlin nebo odprýskáním kousků betonu, což ohrožuje trvanlivost konstrukcí.

Výskyt reaktivních forem kameniva je jednou z nejzákeřnějších forem porušení betonu. To vyplývá z kombinace několika příčin, kterými jsou:

- Je obtížné a zdlouhavé zjistit a zhodnotit přítomnost reaktivních forem křemene.
- Reaktivní silika není rozdělena pravidelně, je přítomna v některých zrnech kameniva, v jiných zcela chybí. V kamenivu tedy není zjištěna, pokud daný vzorek neobsahuje dostatek reaktivních zrn.
- Sklon betonu k ASR závisí na obsahu alkálií v betonu; pokud je v 1 m<sup>3</sup> betonu přítomno více než 2 kg alkálií, může dojít k ASR.
- ASR nastává pouze ve vlhkém prostředí, takže k ní dochází zejména u venkovních konstrukcí. Ovšem může nastat i u průmyslových podlah, které nejsou opatřeny izolací proti vodě z podkladu.
- ASR probíhá velmi pomalu. Může být urychlena vyšší teplotou.

Protože ASR představuje velmi škodlivý a těžko indikovatelný způsob koroze betonu, je nejlepší cestou proti ní prevence. To znamená použití struskových nebo vysokopecních cementů, pucolánových cementů nebo směsných cementů, které redukují její nebezpečí, respektive působí jako inhibitory ASR. [9]

Aby drobné nebo hrubé kamenivo mohlo být považováno za odolné proti alkalické reakci, musí podle zahraničních pramenů obsahovat nejméně 95 % odolných hornin nebo minerálů a nesmí být znečištěno jakýmkoliv množstvím opálu, tridymitu, sopečného skla nebo cristobalitu, nebo neobsahuje celkem více než 2 procenta hmotnostní křemičitého rohovce, pazourku nebo

chalcedonu. U umělého kameniva se považuje expandovaná vysokopepní struska jako odolné kamenivo vůči ASR. [31]

#### **4.2.1.8 Alkalicko uhličitanová reakce**

Existuje ještě jeden typ reakce mezi alkáliemi z cementu a kamenivem. Kamenivo, které je na ni náchylné, se vyznačuje přítomností velmi drobných krystalků dolomitu nebo vápence. Tato reakce nezpůsobuje objemové změny jako ASR, protože objem produktů je menší než objem složek. Mechanismus této reakce není stále dobře vysvětlen zdá se, že spočívá v přeměně dolomitu  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  na vápenec  $\text{CaCO}_3$  a brucit  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Tento proces se nazývá dedolomitizace. Důležitá je přítomnost jílu, který hraje důležitou roli při absorpci vody, zatímco jemně krystalický dolomit nebo vápenec vodu absorbuje. [9]

#### **4.2.1.9 Obsah síranů v kamenivu**

V kamenivu se můžeme setkat se sírany ve formě sádrovce  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (dihydrát síranu vápenatého) nebo anhydritu ( $\text{CaSO}_4$ ). Převyšuje-li obsah síranů (vyjádřených jako  $\text{SO}_3$ ) v kamenivu hodnotu 0,2 %, hrozí nebezpečí popraskání betonu z důvodu tvorby ettringitu v zatvrdlém betonu (vnitřní síranová koroze).

Omezení obsahu síranů v kamenivu se může zdát nelogické, protože v cementu jsou sírany přítomny (sádrovec a anhydrit). Při výrobě cementu jsou sírany semílány společně se slínkem. Díky jejich jemnosti se rozpouštějí rychle po smíchání cementu s vodou, bezprostředně reagují s alumináty ze slínku a reakční produkty (primární ettringit) tvoří na povrchu zrn cementu povlak. Sírany tím zabraňují rychlému tuhnutí cementu, působí jako regulátor tuhnutí. Expanze spojená se vznikem tohoto primárního ettringitu nemá negativní dopad, protože k ní dochází rovnoměrně kolem všech zrn cementu a pouze v prvních hodinách hydratace cementu, kdy je beton ještě plastický. Naproti tomu sírany v kamenivu nemusejí být tak jemnozrné a mohou se ve vodě, která zaplňuje kapilární póry v betonu, rozpouštět pomalu. Díky tomu mohou sírany reagovat s C-A-H velmi zvolna, během měsíců a let. Vzniká takzvaný sekundární ettringit, nebo dodatečně vznikající ettringit. Vzniká v pozdější době, tedy v zatvrdlém betonu a může vyvolat škodlivá napětí, protože vznik ettringitu je provázen expanzí. Sírany jsou v tomto případě v betonu rozděleny nerovnoměrně; jsou lokalizovány pouze v blízkosti některých zrn kameniva, a proto způsobují lokální nerovnoměrná napětí. [9]

#### **4.2.1.10 Obsah chloridů v kamenivu**

Kamenivo může obsahovat maximálně 0,05 % chloridů. Je tomu tak kvůli ochraně výztuže proti korozi. V prostém betonu, tedy v betonu bez výztuže, nehrozí nebezpečí ze strany chloridů z kameniva, vyjma krystalizace solí na povrchu betonu, takzvaných výkvětů. Ty se objevují u konstrukcí, které jsou střídavě vystaveny mokru a suchu. Až na vzácné výjimky představuje kamenivo kontaminované chloridy mořský písek. Ten může být chloridů, které jsou rozpustné ve vodě (jako je NaCl), zbaven práním v pračkách kameniva. [8]

## **5 PARAMETRY PROVZDUŠNĚNÍ ČERSTVÉHO BETONU**

Vzduchové póry jsou nezbytnou součástí betonů odolných vůči zmrazování a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich. Již před více než 50 lety byl použit záměrně vnesený vzduch do betonu, aby se snížilo poškození betonu způsobené působením opakovaného zmrazování a rozmrazování.

Velikost zkušebního vzorku pro testování obsahu vzduchu v čerstvém betonu by měla být minimálně 1,5x násobek zkušebního betonu, který potřebujeme pro vykonání požadované zkoušky. Vzorek by neměl být odebírán, například při čerpání betonu, z první, nebo poslední části čerpaného betonu. Při betonáži by měl být vzorek odebrán minimálně pro každých 75 m<sup>3</sup> betonu, alespoň jednou denně. [23]

### **5.1 Metody stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu**

- Metoda vodního sloupce

Nad vzorek zhutněného betonu se známým objemem, uložený v uzavřené nádobě se nalije do předem stanovené výšky voda. Nad vodní hladinu se zavede předem stanovený tlak vzduchu. Snížení objemu vzduchu ve vzorku betonu se měří jako objem odpovídající pozorovanému poklesu hladiny vodního sloupce. Stupnice vodního sloupce je nastavena v procentním podílu vzduchu ve vzorku zkoušeného betonu. [15]

- Gravimetrická metoda

Je nejstarší metodou určování obsahu vzduchu v betonu. Tato metoda je založena na zjištění rozdílu hmotnosti provzdušněného betonu jako celku k/ke hmotnosti všech surovin použitých v betonu. U této metody je nutné znát specifickou hmotnost všech materiálů použitých ve zkoušeném betonu. [24]

- Tlakoměrná metoda

Tato metoda je založena na principu, že jedinou stlačitelnou složkou čerstvého betonu je vzduch. Tlakovou metodu není možné použít pro beton, který je vylehčen lehkým kamenivem, nebo pro beton, ve kterém je použito kamenivo s vysokou nasákavostí. V těchto případech se doporučuje použít volumetrickou metodu. [24]

## **5.2 Prostorové rozložení vzduchových pórů v čerstvém betonu**

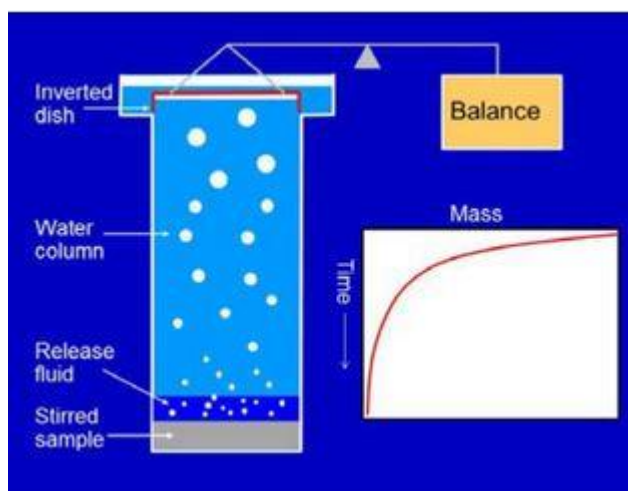
Při stanovení rozložení vzduchových pórů v čerstvém betonu se používá zařízení pro zkoušku, které se označuje „Vzduchotěsný analyzátor“, Air Void Analyzer. Zkušební přístroj v podstatě určuje objemové a rozměrové parametry vzduchových pórů menších než 2 mm a umožňuje předpovědět Spacing factor (L) ve ztvrdlém betonu a specifický povrch pórů ve ztvrdlém betonu. Vzduchové póry zachycené ve zkoušené maltě o maximálním zrně kameniva 6 mm, mohou být za určitých podmínek převedeny do kapaliny bez ovlivnění množství nebo velikosti těchto dutin.

Trvanlivost betonu vzhledem k vystavování zvlhčovacími cykly a cykly zmrazování a rozmrazování může být zlepšena záměrným zavedením vzduchových pórů v cementové pastě za předpokladu, že vzduchové póry jsou od sebe vzdáleny v určitých mezích. Obecně platí, že mrazuvzdorný beton má Spacing factor menší než 0,200 mm a specifický povrch vzduchových pórů větší než  $25 \text{ mm}^{-1}$ .

Tato metoda poskytuje relativně přesné a včasné informace o Spacing factoru a specifickém povrchu vzduchových pórů. Zkouška se provádí na čerstvém betonu ihned po zamíchání. [12]

## Princip metody

Vzduchové bublinky unášené ze vzorku betonu, který se získá ze směsi v čerstvém stavu speciálním nástrojem pro odběr vzorku, jsou unášeny do modré kapaliny specifických vlastností. Za předpokladu, že kapalina má správnou viskozitu a hydrofilní charakter, bublinky vzduchu zachovají stejnou velikost jako vzduchové póry v betonu. Nad modrou kapalinou je sloupec vody, jehož prostřednictvím bubliny stoupají vzhůru. Podle Stokesova zákona větší bubliny stoupají rychleji, než menší.

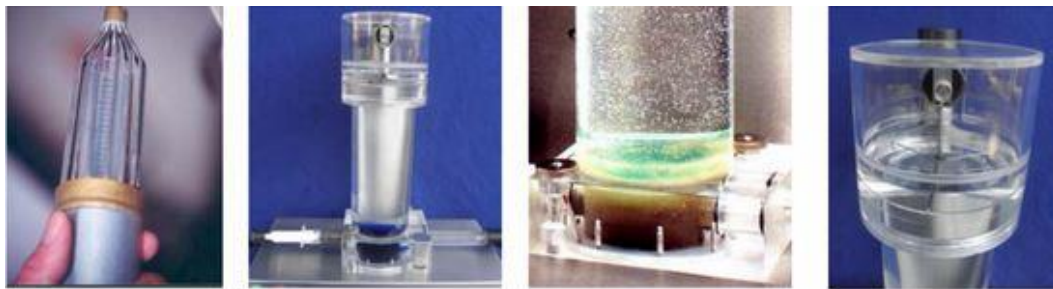


Obr. 5.2.1 – Schéma přístroje AVA [10]

Vzduchové bubliny stoupají vzhůru a shromažďují se pod ponořenou Petriho miskou. Miska je ponořena dnem vzhůru a připojena k citlivým senzorům, která zaznamenávají prostřednictvím nárazů vzduchu do Petriho misky počet a velikost bublin. Vzduch působí na misku jako vztlak, tudíž se hmotnost misky snižuje. Zdánlivá hmotnost misky se zaznamená jako funkce času.

Na zaznamenané zdánlivé hmotnosti misky systém vypočte pomocí algoritmu distribuci a velikost vzduchových pórů v betonu. [12]

## **Popis zkoušky**



*Obr. 5.2.2 – Pomůcky pro přístroj AVA – 3000 [12]*

Zkušební postup:

- Vzorek zkoušeného betonu je pořízen přes vibrační drátěnou klec. Beton vstupuje do klece, která vylučuje částice větší než 6 mm. Vzorek odebereme do injekční stříkačky.
- Vzorek se stříkne do zkušebního válce s Petriho miskou. Vzorek se mírně míchá po dobu 30 sekund magnetickým míchadlem a vzduchové póry jsou tím pádem uvolněny.
- Vzduch se ze zkoušeného betonu odděluje v dávkách, které závisejí na velikosti pórů. Bubliny jsou shromažďovány na dně obrácené misky a působí na misku vztlačkovou silou, takže ji nadlehčují. Počítač zaznamená změnu hmotnosti v závislosti na čase.
- Měření pokračuje po dobu cca 25 minut.
- Software vytváří graf distribuce velikosti bublin a histogram různých velikostí bublin.

[11]

## **Měřící rozsahy**

Je důležité, aby teplota kapaliny v průběhu postupu měření zůstala v rozsahu, pro který je systém kalibrován. Pokud je teplota mimo rozsah kalibrace přístroje, má negativní vliv na viskozitu kapaliny a výsledky budou méně přesné. Je-li teplota mimo rozsah kalibrace, je nutné tuto skutečnost zaznamenat na protokolu o zkoušce.

V případě, že je obsah vzduchu v čerstvém betonu příliš nízký, změny hmotností po prvních minutách zkoušení budou velmi malé ve srovnání s přesností přístroje (0,01 g). To může mít za následek nedostatek přesnosti



a následně může být test zastaven příliš brzy, pokud nezná přístroj obsah velmi jemných pórů.

V případě, že je obsah vzduchu příliš velký, může dojít k turbulenci v kapalině. [11]

### **5.3 Stanovení obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu**

Měření obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu je možné až poté, co beton získá určitou pevnost. Zkušební těleso lze upravit do normou definovaných rozměrů již po 7 dnech zrání. Vzorky pro zjištění obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu lze odebrat i z hotové konstrukce. Nastává zde problém, že výsledky se mohou lišit oproti výsledkům z laboratoře až o 10 % z absolutní hodnoty výsledku (např. 5,0 % ku 5,5 %). Existuje mnoho důvodů, proč se výsledky liší, například:

- při ukládání betonu (vibraci), může být u polohy vibrátoru narušena struktura vzduchových pórů v betonu,
- změny tlaku při čerpání betonu pomocí pumpy na čerpání betonu,
- při míchání betonu v autodomíchávacích dochází k rozdílným obsahům vzduchu v různých dodávkách čerstvého betonu.

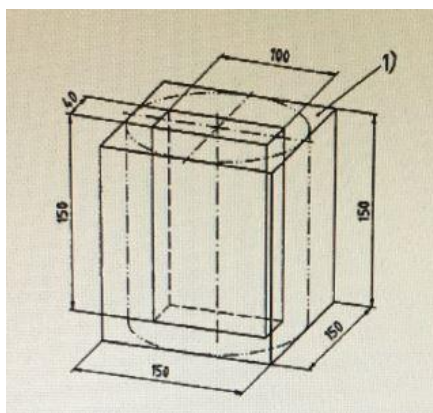
Po zatvrdnutí betonu prostor, který byl v čerstvém betonu vyplněn vzduchem, zůstane ve ztvrdlém betonu jako dutina. Nejdůležitějšími parametry pórového systému betonu jsou celkový obsah vzduchu (A), součinitel prostorového rozložení pórů (L) a specifický povrch pórů ( $\alpha$ ).

[24]

#### **5.3.1 Součinitel prostorového rozložení pórů ve ztvrdlém betonu**

Zkouší se dle ČSN EN 480 – 11. Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody: Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. Zkušební vzorky pro analýzu se zhotoví rozřezáním vzorku ztvrdlého betonu. Řez se vede kolmo k horní povrchové ploše vzorku. Tyto vzorky se potom brousí a leští tak, aby se vytvořil hladký rovný povrch vhodný pro zkoumání mikroskopem. Struktura vzduchových pórů se zjišťuje podrobným snímáním podél řady měřících přímk, vedených rovnoběžně s původním horním povrchem vzorku. Počet vzduchových pórů protnutých měřícími

přímkami se zaznamená stejně tak jako jednotlivé délky třetiv. Vyrobit se vzorky, jejichž rozměry jsou 150×100×20 mm.



*Obr. 5.3.1.1 – Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku Spacing factoru [20]*

Vzorky se umístí na manipulační stůl tak, aby měřicí přímky, které se mají sledovat, procházely rovnoběžně s původním horním povrchem zkušebního tělesa.

Pro každý zkušební vzorek je požadována minimální délka soustavy měřících přímek 1 200 mm dávající celkové minimum 2 400 mm na zkoušku. Čtyři měřicí přímky vedené přes šířku musí být umístěny v jeho horní části a měly by být umístěny cca 6 mm od sebe. Další čtyři přímky se umístí v dolní části vzorku a další 4 do spodní části vzorku. Součet délky měřících přímek musí splňovat minimální délku 2 400 mm.

Povrch se pozoruje digitální kamerou se zvětšením ( $100 \pm 10$ ). Zvětšení se během zkoušky nesmí měnit. Data z měření vyhodnocuje a poskytuje počítačový software, který je propojený s digitální kamerou i manipulačním stolem. Software vyhodnocuje zkoušku a na základě počtu třetiv a délky měřících přímek vyhodnocuje prázdné póry, plné póry, označené při vstupu do programu. Výstupními hodnotami jsou tabulky se všemi vyjmenovanými parametry a histogram rozložení vzduchových pórů.[20]

## **5.4 Srovnání Spacing factoru v čerstvém a ztvrdlém betonu**

V roce 1991 se Hansen pokoušel najít způsob zjištění součinitele prostorového rozložení pórů v čerstvém betonu. Zkoušel použít laserový scan pro zkoumání ledu vzniklého v dutinách čerstvého betonu zmrazeného kapalným dusíkem. Tato metoda je možná pouze pro laboratorní podmínky

a navíc je velmi nákladná a časově náročná, proto se v současnosti nepoužívá.  
[32]

Hlavní používanou metodou pro zkoušku stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu a prostorového rozložení pórů v čerstvém betonu je Air Void Analyser. Přístroj má i své negativní stránky. Problémy spojené s přístrojem mohou být následující:

- Přístroj může někdy odmítnout otestovat dobře namíchaný beton. V betonu může být buď hodně, nebo naopak málo vzduchu. Magnetické míchátko čerstvého betonu se může v určité poloze zaseknout o cementovou pastu, pokud je příliš tuhá, tudíž se nerozmíchá a měření se stává neplatné. Vůbec se neuskuteční.
- Výsledky získané na jednom čerstvém betonu nemusí být přesně opakovatelné, tj. nemusí být dosaženo stejného výsledku i přes velkou přesnost přístroje.
- Výsledky získané z čerstvého betonu pomocí přístroje nemusí být vždy korelovat s výsledky získanými pomocí mikroskopické analýzy ztvrdlého betonu. Hodnoty získané pomocí Air Void Analyseru jsou většinou vyšší než hodnoty získané ze ztvrdlého betonu.

Proměnné přispívající k nesouladu výsledků mezi měřením na čerstvém a ztvrdlém betonu mohou být:

- Měření mimo teplotní rozsah 21 – 25 °C ovlivní viskozitu kapalin ve stoupajícím sloupci a výsledky budou méně přesné.

## **Pracovní postup Air Void Analyseru**

Zkušební přístroj je dodáván s manuálem od výrobce, jak se má postupovat při provádění zkoušky. I přesto však mohou nastat malé odchylky od předepsaného postupu. Chyba se může do měření vnést například tak, že modrá AVA kapalina o specifických vlastnostech je do vodního sloupce vložena až po stříknutí zkušební vzorku do vodního sloupce, nebo obrácená Petriho miska (váha) je osazena až po stříknutí malty do vodního sloupce. Správný postup je, že se nejprve do vodního sloupce vlije dispergační kapalina, poté se osadí Petriho miska, poté se stříkne vzorek zkoušené malty, vynuluje se váha a spustí se měření.

Jiné odchylky měření mohou být způsobeny například ztrátou vzduchu způsobené při vytváření vzorku malty pomocí vrtačky s vibrátorem, vyvoláním

dalších bublin, pokud ve zkušební stříkačce zůstane bublina vzduchu, která se přenese vstříknutím do vodního sloupce, nebo příliš krátký čas probíhající zkoušky.

Tab č. 5.4.1 – Srovnání SF v ČB a ZB

Charakteristika	Čerstvý beton	Ztvrdlý beton	Ztvrdlý beton
Přístroj	AVA – 2000/3000	Mikroskop	Mikroskop
Celkový obsah vzduchu	Vyšší než u zkoušky ze ZB	Nižší než u zkoušky z ČB	Nižší než u zkoušky z ČB
Zkušební metoda	Založeno na ASTM C 457 <sup>1)</sup>	ČSN EN 480 -11	ASTM C 457
Max. zrno kameniva pro zkoušku	< 6 mm	Dle betonu	Dle betonu
Měřitelný rozsah vzduchu	3,5 – 10,0 %	-	-
Součinitel prostorového rozložení pórů	Nepatrný rozdíl		

<sup>1)</sup> Výstupní hodnoty z měření na čerstvém betonu jsou vypočteny tak, aby parametry odpovídaly hodnotám, které jsou zjišťovány pomocí lineárních měření na vyleštěném povrchu ztvrdlého betonu za použití předpokladů uvedených v normě ASTM C 457 Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete. To znamená, že průměrná délka měřeného vzduchového póru se rovná 2/3 skutečného průměru vzduchového póru. Pro výpočet specifického povrchu a součinitele prostorového rozložení pórů jsou uvažovány vzduchové póry stejné velikosti a jsou umístěny v mřížkových bodech pravidelného čtvercového pole.

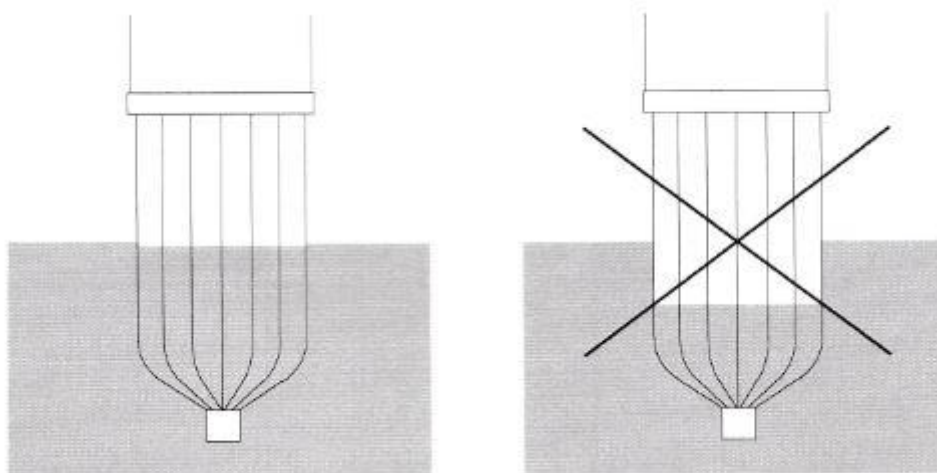
Co se týče výhod a nevýhod stanovení součinitele prostorového rozložení pórů ve ztvrdlém betonu, jsou následující:

- Při přípravě vzorků (leštění, broušení) může dojít k odlupování hrubého zrna kameniva a tím ke vzniku dutin, které zkreslují měření. Mohou se chovat jako vzduchový pór.
- Může dojít k nedostatečnému zatření zinkové pasty do pórů na vyleštěném vzorku, tudíž výsledek bude nereálný z hlediska obsahu vzduchu i Spacing factoru, hodnoty budou nižší, než je reálná hodnota. Vzorek lze dodatečně znovu zatřít pastou.

- Metoda je prováděna na automatickém snímacím stolku vybaveným specifickým softwarem, který má možnost snímat tětiny, protínající vzduchové póry v měřičských přímkách zcela automaticky.
- Metoda při vyloučení lidských faktorů, teda při přípravě vzorků odborně proškoleným personálem, je velmi spolehlivá.

## **Shrnutí poznatků o rozdílech měření na čerstvém a ztvrdlém betonu**

Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu lze provádět dle ČSN EN 12350 – 7 pomocí tlakového hrnce (nejběžněji), a dle ASTM 457 aplikované na zkušební přístroj Air Void Analyser. Obě metody mají své pro, a proti. Metoda stanovení pomocí tlakové nádoby na zjišťování obsahu vzduchu v čerstvém betonu je náchylná na více faktorů. Například na nutnost dokonalého zhutnění čerstvého betonu ve zkušební nádobě. Beton musí být v nádobě zhutněn do takového stavu, v jakém bude uložen v konstrukci. Nedokonalé zhutnění betonu může zkreslit obsah vzduchu v čerstvém betonu, protože tlaková nádoba pracuje na principu, že jediná stlačitelná složka v čerstvém betonu je vzduch. Další chyba měření může být způsobena nedokonalou přípravou betonu v tlakové zkušební nádobě. Výhoda této zkoušky pomocí tlakové nádoby je v menší finanční náročnosti, než u zkoušení obsahu vzduchu v čerstvém betonu pomocí Air Void Analyseru. Další z výhod je větší rychlost zkoušky (cca 5 minut tlaková nádoba, 25 minut AVA) a větší rozmezí stanoveného vzduchu v čerstvém betonu. Pomocí Air Void Analyseru lze zkoušet betony, které mají obsah čerstvého vzduchu v rozmezí 3,5 – 10,0 %. Pokud je obsah vzduchu příliš nízký, vztlak vzduchových pórů působících na váhu se nemění oproti původní hodnotě na začátku měření, kdy jsou ze zkoušeného betonu vypuzeny první vzduchové póry. Váha nedisponuje přesností vyšší než 0,01 g. Pokud je naopak obsah vzduchu větší než 10 %, v kapalině se mohou při rozmíchávání zkoušeného vzorku betonu projevit turbulence, čímž se měření značně zkreslí. U Air Void Analyseru odpadá nutnost hutnit beton. Zkušební vzorek lze odebírat například přímo z kolečka. Při odebírání vzorku pomocí klece, která je rozvibrována vibrátorem připojeným na vrtačku, je nutnost dodržet koordinaci pohybu při odebírání vzorku. Vzorek se považuje za špatně odebraný, je-li rychlost ponoření klece do čerstvého betonu příliš rychlá, nebo síla vibrace při odebrání příliš malá. Přes odebírací klec se oddělená malta frakce o maximálním zrnu 6 mm musí dostávat rovnoměrně. Postup odebírání je vysvětlen na obrázku níže.



*Obr. 5.4.1 – Odebírání vzorku pro AVA [11]*

Při dalším odebírání vzorku do injekční stříkačky je možnost při špatném provedení zanést do čerstvého odebraného betonu další vzduchové bubliny, které zkreslí výsledek měření.

Obrovskou výhodou metody AVA je avšak možnost zjištění Spacing factoru v čerstvém betonu. Pomocí Spacing factoru lze předpovědět Spacing factor ve ztvrdlém betonu, a tím alespoň hrubou predikci odolnosti v budoucnosti ztvrdlého betonu proti účinkům působení chemických rozmrazovacích látek. Takovou informaci tlakové metody zjišťování obsahu vzduchu v čerstvém betonu neposkytují, ani dle ČSN EN 12350-7 a ani dle americké normy ASTM C 231 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.

Co se týče srovnání distribuce vzduchových pórů v čerstvém a ztvrdlém betonu, ve prospěch metody s přístrojem AVA hraje včasná znalost distribuce vzduchových pórů v čerstvém betonu, a z toho plynoucí možnost korigovat složení čerstvého betonu před uložením do konstrukce a tím předejit konfliktům ohledně kvality provedeného betonu. Zkouška distribuce vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu umožňuje vytvoření zkušebních těles pro zkoušku SF nejdříve po 7 dnech po uložení betonu do konstrukce, nebo do forem na vytvoření zkušebních těles. S vybetonovanou konstrukcí se nedá již nic dělat, není již možný žádný zásah do změny mikrostruktury betonu, zejména vnést další provzdušnění do betonu.

Například americká norma ASTM C 457 pro mikroskopické stanovení obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu rozlišuje dvě metody stavení. Metodu

A – metoda lineárního proložení přímek zkoušeným betonem, metoda identická jako dle ČSN EN 480 – 11, a metoda B – modifikovaná počítačová metoda. Metoda B je založena na určení objemových složek betonu na základě pozorování frekvence oblastí, které se shodují s pravidelnou sítí. Systém měření má definované pozastavení v měření, aby se umožnilo stanovení složení. Princip metody je obdobný jako dle Rosiwala. V následující tabulce je možno vidět rozdíly mezi metodou A a B. Rozdíly jsou velmi malé. Měření probíhalo v různých laboratořích.[11] [12] [32] [36]

Specimen	Air Content, %		Voids/in.	
	Point Count <sup>A</sup>	Linear Tr. <sup>B</sup>	Point Count <sup>A</sup>	Linear Tr. <sup>B</sup>
No. 1	3.00	2.91	2.24	2.33
No. 2	3.70	3.59	5.69	5.39
No. 3	5.66	5.46	7.44	7.44
No. 4	8.20	7.97	12.42	12.17

<sup>A</sup> Modified Point Count: 6 labs; 12 operators; and 26 determinations.  
<sup>B</sup> Linear Traverse: 3 labs; 7 operators; and 15 determinations.

Obr. 5.4.2 – Srovnání výsledků dle ASTM C 457 metoda A a B [36]

## 6 ZKOUŠKY VLASTNOSTÍ PROVZDUŠNĚNÉHO BETONU

### 6.1 Čerstvý provzdušněný beton

#### Zpracovatelnost čerstvého betonu

Pro stanovení zpracovatelnosti čerstvého betonu se dle ČSN EN 12350 používají metody Zkouška sednutím, Zkouška VeBe, Zkouška zhutnitelnosti, Zkouška rozlitím. Pro provzdušněné betony se nepoužívají zkoušky VeBe a Stupeň zhutnitelnosti. Dále máme zkoušky tekutosti, zkoušky SCC betonů. Jedná se o zkoušku rozlitím, L-Box test, J- Ring test, V-Funnel Test, Orimet.

Zkouška se provádí dle ČSN EN 12350 – 2. Zkoušení čerstvého betonu: Část 2: Zkouška sednutím Při zkoušce sednutím se používá pro přípravu zkušebního tělesa tuhá kovová forma ve tvaru komolého kužele (Abramsův kužel daných rozměrů). Forma se pevně zafixuje, naplní se ve třech vrstvách, každá vrstva se zhutní 25 vpichy. Forma se oddělí svislým tahem od podložky v průběhu 2 až 5 sekund. Ihned po zvednutí formy se změří výška sednutí kužele oproti původní výšce kužele „h“ na nejbližších 10 mm. [13]

## **Objemová hmotnost čerstvého betonu**

Zkoušení se provádí dle ČSN EN 1250 – 6 Zkoušení čerstvého betonu: Část 6: Objemová hmotnost. Používá se kovová dostatečně tuhá těsná nádoba, jejíž nejmenší rozměr musí být nejméně čtyřnásobkem největší jmenovité velikosti zrna hrubého kameniva, minimálně avšak 150 mm a její objem nesmí být menší než 5 l. Čerstvý beton se ve formě dokonale zhutní a objemová hmotnost  $D$  se vypočte a zaokrouhlí na nejbližších  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . [14]

## **Obsah vzduchu v čerstvém betonu**

Zkouška se provádí dle ČSN EN 12350 – 7. Zkoušení čerstvého betonu: Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu se používají přístroje pracující na principu Boyleova - Mariottova zákona, pro které jsou stanoveny specifické zkušební postupy:

- typ A – měří změnu stavu vodního sloupce vlivem definovaného tlaku vzduchu,
- typ B – měří snížení tlaku vzduchu v přetlakové komoře, která byla předem natlakovaná, a uvolněnému tlaku byl vystaven povrch betonu

Pro účely této bakalářské práce byla použita metoda B, tlaková metoda. Známý objem vzduchu o známém tlaku je propojen v uzavřené nádobě s neznámým objemem vzduchu ve vzorku zhutněného betonu. Stupnice tlakoměru je kalibrována v procentním podílu obsahu vzduchu ve vzorku betonu. Obsah vzduchu se vyjadřuje v % objemu se zaokrouhlením na nejbližších 0,1 %. [23]

## **Součinitel prostorového rozložení pórů v čerstvém betonu**

Postup zkoušení je popsán v kapitole 5.2.

### **6.2 Ztvrdlý provzdušněný beton**

## **Objemová hmotnost ztvrdlého betonu**

Zkouška se provádí dle ČSN EN 12390 -7 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Princip zkoušky spočívá ve zjištění hmotnosti zkušebního tělesa vztažené na objem zkušebního tělesa. Jestliže jmenovitý rozměr frakce



kameniva ve zkušebním tělese, betonovaném do formy, je větší než 25 mm, pak nejmenší objem nesmí být menší než  $50 D^3$ , kde  $D$  je jmenovitá největší velikost zrna hrubého kameniva. Objemová hmotnost se zaokrouhlí na nejbližších  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . [16]

## **Pevnost v tlaku zkušebních těles**

Pevnost v tlaku betonu se zkouší dle ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles na zkušebních tělesech ve tvaru krychle o hraně 150 mm nebo na zkušebním tělese tvaru válce o výšce 300 mm a průměru 150 mm. Tělesa jsou rovnoměrně zatěžována v zatěžovacím lisu, až do meze porušení. Výsledkem zkoušky je zjištěná maximální hodnota síly  $F$  při porušení v  $N$  a pevnost v tlaku zkušebního tělesa udávaná v  $N \cdot \text{mm}^2$  s přesností na  $0,1 N \cdot \text{mm}^2$ . [17]

## **Odolnost betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek**

Zkouška se provádí dle ČSN 731326 /Z1. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – automatické cyklování. Beton je vystaven působení rozmrazovací látky (3% roztok  $\text{NaCl}$ ) na horní vrstvu (výrobní) plochu zkušebního tělesa a definovanému působení střídavých cyklů kladných a záporných teplot v určitých časových režimech. Zkouška probíhá po etapách, po 25 cyklech, po každé etapě se zachytí odpad a vysuší se v sušárně. Stanovený počet cyklů pro metodu A je 100 cyklů pro kontrolní zkoušku a 150 cyklů pro průkazní zkoušku. Výsledkem zkoušky je stanovení hmotnosti odpadu vztaženého na  $1 \text{ m}^2$  zkušební plochy ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), která se porovná s limitní hodnotou pro daný metodický postup. Zpravidla maximálně  $1\,000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . [19]

Dále je možné provádět zkoušku metodou C. Tato metoda zkoušky se používá pro automaticky řízené cyklické střídání kladných a záporných teplot, působící na povrch tělesa, na kterém je objímka, na které je nalit 3% roztok  $\text{NaCl}$ . Je založena na poznatku, že hlavním faktorem porušování povrchu betonové konstrukce, na kterou působí mrazové cykly a roztoky chemických rozmrazovacích látek, je gradient koncentrace chloridů v povrchové vrstvě betonu.

Jako objímka se používá například pruh automobilové vzdušnice, který se opatří vrstvou kaučukového lepidla, a vrstvou kaučukového lepidla se opatří

také zkoušený vzorek na místech, kde bude doléhat objímka. Takto připravené těleso se vloží do klimatizační komory a nalije se na něj 3% roztok NaCl o tloušťce vrstvy cca 5 mm. Je zahájeno cyklování, které se skládá z 3 hodin zmrazování a 3 hodin rozmrazování. Po několika cyklech (4, 8, 12,...) je třeba pohmatem zjistit, zda nedochází k porušení vzorku. Při kladném zjištění se roztok slije, nejdéle však po 7 dnech, a těleso se vyjme z klimatizační komory. Uvolněné částice se splaví do odpařovací misky a nechají se v sušárně vysušit do konstantní hmotnosti. Omyté zkušební těleso ponechá v laboratorních podmínkách ve stavu, kdy je až po okraj objímky povrch tělesa zaplněn vodou. Po 24 hodinách se opakuje postup zkoušky. Odolnost proti působení vody a roztoku NaCl se hodnotí dle součinitele odolnosti D1 až D5 v  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ . [19]

### **Pevnost v tahu za ohybu**

Pevnost v tahu za ohybu se zkouší dle ČSN EN 12390 – 5 Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Tělesa jsou ve zkušebním zařízení zatěžována čtyřbodovým nebo třibodovým ohybem až do meze porušení. Výsledkem měření je síla  $F$  zaznamenaná při porušení zkušební vzorku. Pevnost v tahu za ohybu se zaokrouhluje na nejbližších  $0,1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Výsledek je doplněn o typ zatěžování (jedno nebo dvě zatěžovací břemena). [23]

### **Hloubka průsaku tlakovou vodou**

Zkouší se dle ČSN EN 12390 – 8. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Podstatou zkoušky je to, že se nechá tlaková voda působit na definovaný povrch ztvrdlého betonu. Zkušební těleso se pak rozlomí a změří se maximální hloubka průsaku. Potřebujeme k této zkoušce zařízení, které je schopné aby mohla voda působit na zkoušenou plochu a působící tlak mohl být nepřetržitě vyvozován. Zkušební těleso je krychle, válec nebo hranol o délce hrany nebo průměru nejméně 150 mm a žádný rozměr nesmí být menší než 100 mm.

Tělesa se zkouší ve stáří 28 dní a působí na ně tlak vody ( $500 \pm 50$ ) kPa po dobu ( $72 \pm 2$ ) hodin. Po rozlomení tělesa se změří maximální hloubka průsaku a zaokrouhlí se na nejbližší milimetr. [18]

### **Mrazuvzdornost betonu**

Zkouškou mrazuvzdornosti betonu je zkouška střídavého zmrazování a rozmrazování se solí nebo bez soli vodou nasycených betonových trámů počtem cyklů, který je podle požadavku na stupeň mrazuvzdornosti dán

příslušnými normami. Zkouška se provádí dle ČSN 73 1322. Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Základní zkušební těleso pro zkoušení mrazuvzdornosti betonu je zkušební trámec 100 × 100 × 400 mm. Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles se koná ve zmrazovacích cyklech, při kterých musí být teplota mrazicího prostředí v rozmezí – 15 °C až – 20 °C pro betony vystavené mrazu do – 20 °C a v rozmezí – 18 °C až – 23 °C pro betony vystavené mrazu pod – 20 °C. Jeden zmrazovací cyklus se skládá ze 4 hodin zmrazování na vzduchu a dvou hodin rozmrazování ve vodě. Při zmrazování se zkušební tělesa ukládají do prostoru, který musí mít předem požadovanou teplotu, při rozmrazování se zkušební tělesa ukládají do vody + 20 °C teplé.

Po ukončení zmrazování a rozmrazování se zkušební tělesa zkouší na pevnost v tahu za ohybu a zpravidla na pevnost v tlaku.

Výsledek zkoušky se uvádí po ukončení požadovaných cyklů zmrazování a rozmrazování, a to zjištěné úbytky hmotnosti zkušebních těles v % hmotnosti, pevnost zkušebních těles v tahu za ohybu, součinitel mrazuvzdornosti betonu. Beton je mrazuvzdorný na ten počet cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti není menší než 75 % nebo ukazatel nedestruktivní zkoušky dosáhl hodnoty určující mrazuvzdornost podle příslušných norem nebo předpisů. [26] [27]

### **Stanovení součinitele prostorového rozložení pórů ve ztvrdlém betonu**

Metoda zkoušení je popsána v kapitole 5.3.1

## **6.3 Parametry betonů dle ČSN EN 206 a ČSN P 73 2404**

Norma ČSN EN 206 a doplňková norma ČSN 73 2404 kladou na betony vystavené účinkům mrazu a rozmrazování (XF1 – XF4) specifické požadavky, co se týče provzdušnění, minimálního obsahu cementu, maximálního vodního součinitele, atd. Požadavky jsou rozděleny, zda je předpokládána životnost 50 a 100 let. U Předpokládané životnosti 50 let není požadována maximální hodnota Spacing factoru (L), ani hodnota minimálního obsahu účinných mikropórů v betonu.

Tab č. 6.3.1 – Mezní hodnoty pro složení betonu (životnost 50 let)

Charakteristika	Jedn.	Hodnota			
Stupeň prostředí	-	XF1	XF2	XF3	XF4
Maximální vodní součinitel	-	0,55	0,55	0,50	0,45
Min. pevnostní třída	-	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
Minimální obsah cementu	kg·m <sup>-3</sup>	300	300	320	340
Min. obsah vzduchu v ČB při zkoušce podle ČSN EN 12350 – 7 pro beton		-	4,0	4,0	4,0
Maximální průsak vody při zkoušce dle ČSN EN 12390 - 8	mm	50	50	35	35
Odolnost vůči zmrazování a rozmr. dle ČSN 73 1326 – metoda/počet cyklů/odpad	-	-	A/75/1250 C/50/1500		A/100/1000 C/75/1000

Hodnoty jsou převzaty z tabulky F. 1.1

Tab č. 6.3.2 – Mezní hodnoty pro složení betonu (životnost 100 let)

Charakteristika	Jedn.	Hodnota			
Stupeň prostředí	-	XF1	XF2	XF3	XF4
Maximální vodní součinitel	-	0,55	0,50	0,50	0,45
Doplňková spec. min. pevnostní třídy betonu	-	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
Minimální obsah cementu	kg·m <sup>-3</sup>	300	300	320	340
Min. obsah vzduchu při D <sub>max</sub> 8 mm	%	-	4,5	5,0	5,5
Min. obsah vzduchu při D <sub>max</sub> 16 mm		-	3,5	4,0	4,5
Min. obsah vzduchu při D <sub>max</sub> 22 - 32 mm		-	3,0	3,5	4,0
Minimální obsah mikropórů A <sub>300</sub> dle ČSN EN 480 - 11	%	-	1,0	1,0	1,8

Maximální součinitel rozložení vzduchových pórů L dle ČSN EN 480-11	mm	-	0,24	0,24	0,20
Maximální průsak vody při zkoušce dle ČSN EN 12390 - 8	mm	50	35	20	20
Odolnost vůči zmrazování a rozmr. dle ČSN 73 1326 – metoda/počet cyklů/odpad	-	-	A/100/12 50 C75/1250		A/100/1 000 C/75/10 00
Stupeň mrazuvzdornosti (ČSN 73 1322)	-	T100	-	T150	-

Hodnoty jsou převzaty z normy ČSN P 73 2404, tabulka F. 1.2

Z výše uvedených tabulek je zřejmé, že pro betony s životností 100 let jsou kladeny vyšší nároky než na ztvrdlý beton životnosti 50 let. Životnost stavby vyplývá z významnosti stavby. Co se parametru provzdušnění týče, čím je větší zrno kameniva, tím je požadován menší obsah vzduchu v betonu.

## 7 CÍL PRÁCE

Cílem teoretické části práce je shrnutí poznatků o provzdušněných betonech, zejména studium vneseného provzdušnění do čerstvého betonu na jeho vlastnosti v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. Důraz je kladen zejména na posouzení míry vneseného provzdušnění v čerstvém betonu v porovnání s různými parametry betonu ztvrdlého, zejména obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu a trvanlivost betonu. Základní body bakalářské práce budou:

- popis a shrnutí dosavadních vlastností o provzdušněných betonech,
- popis možností srovnávání zkoušek distribuce vzduchových pórů v čerstvém betonu a ve ztvrdlém betonu,
- popis jednotlivých typů provzdušňovacích přísad vyráběných na bázi různých účinných látek a jejich kompatibilita s jednotlivými druhy plastifikačních přísad,
- vliv různých typů provzdušňovacích přísad na vlastnosti čerstvých betonů, zejména s ohledem na trvanlivost betonu.

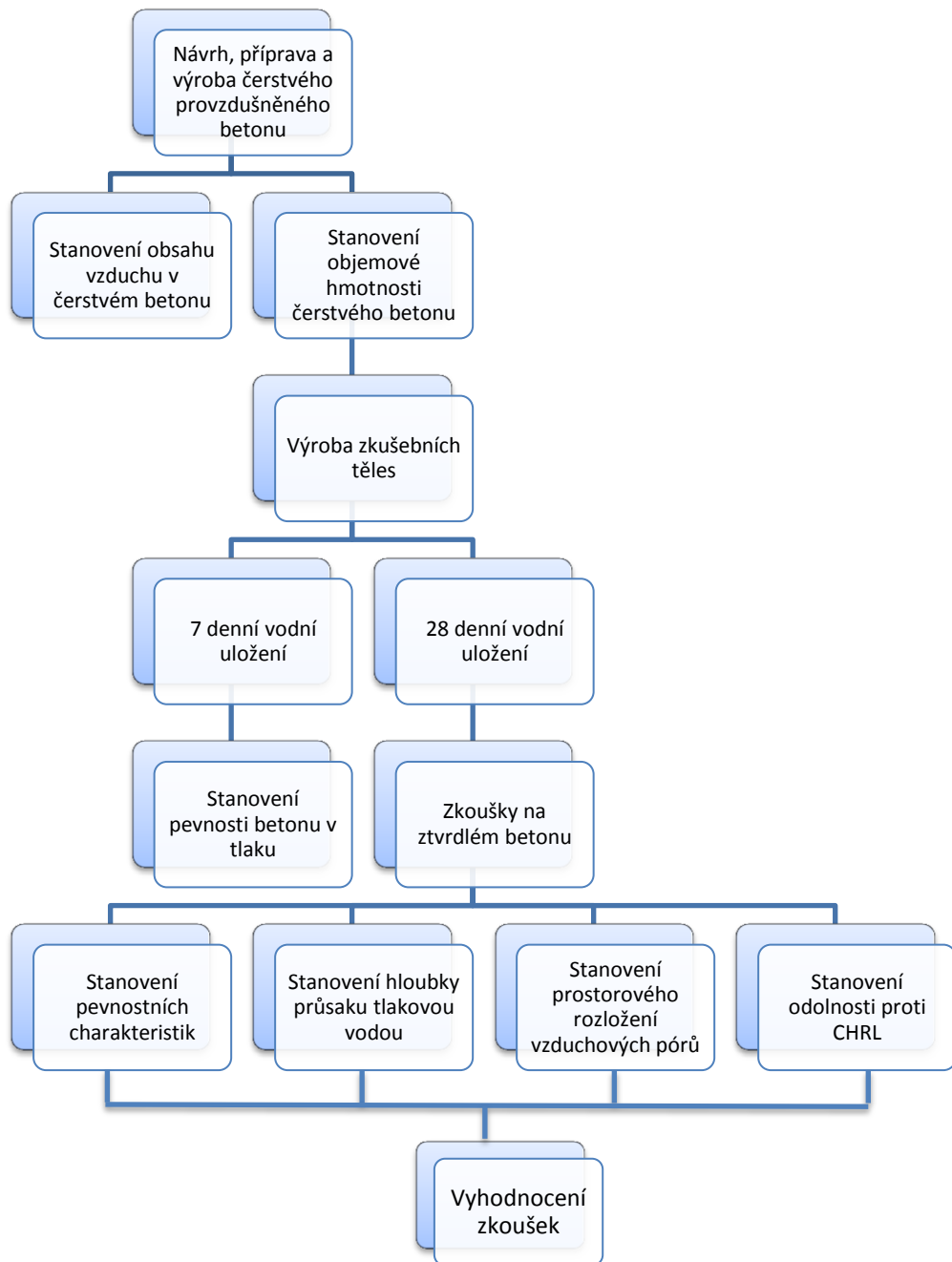
Pro experimentální účely byly použity různé druhy drobného těžného kameniva frakce 0/4 mm. Předpoklad byl použití drobného těžného kameniva různé kvality. Pro zkušební záměsi bylo použito drobné kamenivo z Hrušovan,

Hulína a Žabčic. Výstupem bakalářské práce bude posouzení vlivu provzdušnění v kombinaci s drobným těžným kamenivem různé kvality zejména na odolnost betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám, mrazuvzdornosti betonu a celkový obsahu vzduchu v čerstvém a ztvrdlém betonu.

## **8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

Experimentální část bakalářské práce je zaměřena na sledování vlivu vneseného provzdušnění a různé kvality drobného těžného kameniva frakce 0/4 mm na výsledné vlastnosti betonu. Sledována byla zejména pevnost betonu v tlaku, odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám, hloubka průsaku tlakovou vodou, odolnost proti zmrazování a rozmrazování a v neposlední řadě součinitel distribuce vzduchových pórů, neboli Spacing factor v čerstvém a ve ztvrdlém betonu.

## 8.1 Metodika práce



Po zjištění potřebných parametrů betonu a návrhu složení betonu a výběru a posouzení vlastností vstupních surovin pro výrobu betonu bylo provedeno zamíchání betonu. Bylo namícháno celkem 6 receptur o obsahu vzduchu v čerstvém stavu, který se pohyboval v rozmezí 4,0 – 4,5 % a 6,5 – 7,0 %. Dvojice receptur se lišila druhem kameniva frakce 0/4 mm.

Stanovené vlastnosti betonu byly:

- zpracovatelnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350 – 2,
- objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350 – 6,
- a obsah vzduchu v čerstvém betonu dle ČSN EN 12350 – 7,
- z betonu byla zhotovena zkušební tělesa – zkušební krychle o hraně 150 mm a zkušební trámce o rozměrech 100×100×400 mm. Zkušební tělesa byla uložena ve vodním uložení.
- Na zkušebních tělesech o tvaru krychle o hraně 150 mm byly po 7 a 28 dnech provedeny zkoušky:
- objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12390 – 7,
- pevnost v tlaku zkušebních těles dle ČSN EN 12390 – 3,
- hloubka průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390 – 8,
- odolnosti betonu proti CHRL dle ČSN 731326 /Z1,
- Spacing factor dle ČSN EN 480 – 11.
- Na zkušebních trámcích byly po 28 dnech stanoveny zkoušky:
- pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 12390 – 5,
- mrazuvzdornost betonu dle ČSN 73 1322.

## 8.2 Charakteristika vstupních surovin

### 8.2.1 Cement

Pro výrobu všech receptur byl použit cement – CEM I 42,5 R, Mokrá

Tab č. 8.2.1.1 – Mechanické vlastnosti cementu CEM I 42,5 R Mokrá

Charakteristika	Jednotka	Hodnota
Pevnost po 2 dnech	N·mm <sup>-2</sup>	32,6
Pevnost po 28 dnech	N·mm <sup>-2</sup>	53,7
Měrná hmotnost	kg·m <sup>-3</sup>	3 100

### 8.2.2 Kamenivo

Pro jednotlivé receptury bylo použito kamenivo frakce 0/4 mm, 4/8 mm a kamenivo zrnitosti 8/16 mm.

- Drobné těžené kamenivo, frakce 0/4 mm prané Žabčice, Hulín a Hrušovany
- Hrubé drcené kamenivo, frakce 4/8 mm, Olbramovice
- Hrubé drcené kamenivo, frakce 8/16 mm, Olbramovice

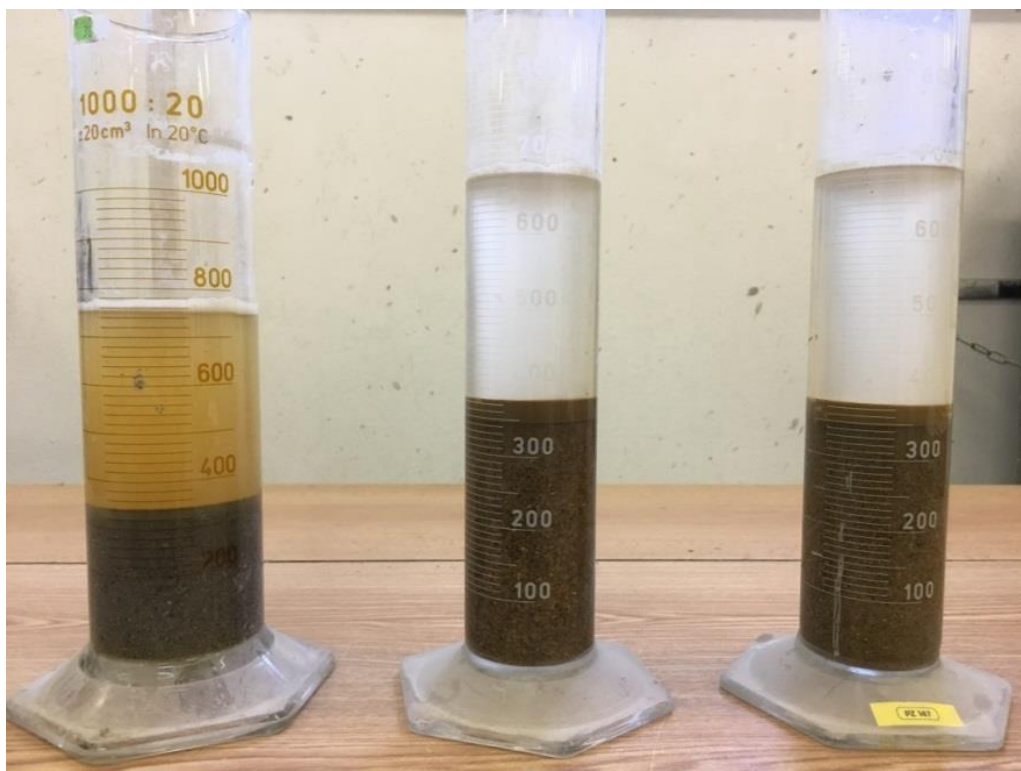


Na použitých kamenivech byly provedeny zkoušky:

- sypné hmotnosti dle ČSN EN 1097 – 3 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva,
- objemové hmotnosti a nasákavosti dle ČSN EN 1097 – 6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti,
- stanovení množství odplavitelných částí a zrnitosti kameniva dle ČSN EN 933 – 1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – síťový rozbor,
- tvarový index kameniva dle ČSN EN 933 – 4 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index.

*Tab. č. 8.2.2.1 – Vlastnosti použitého kameniva*

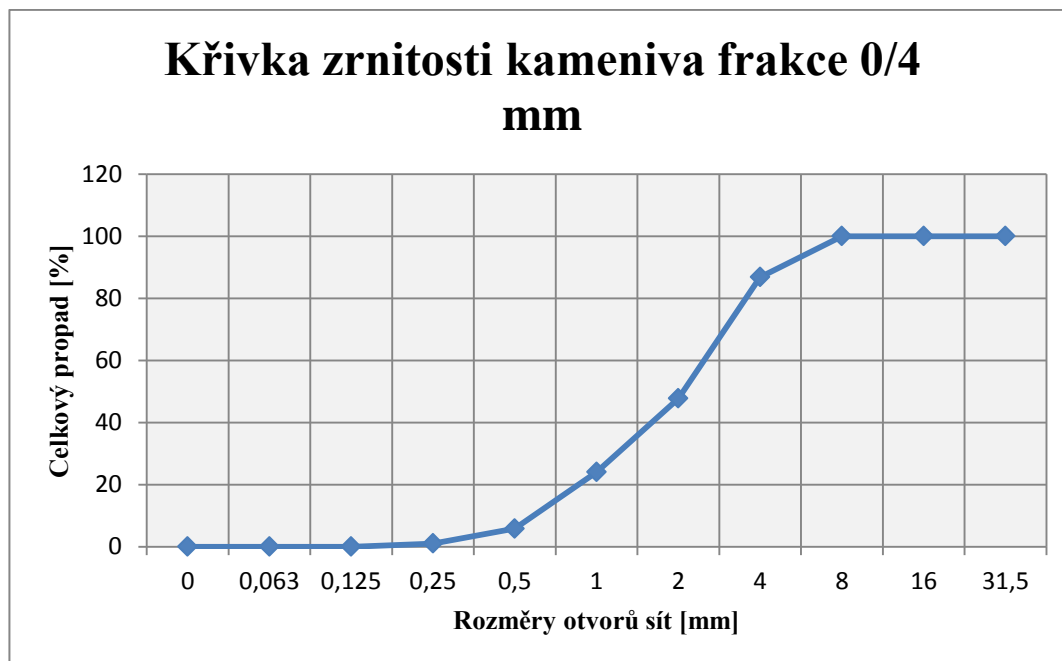
Kamenivo		Sypná hmotnost	Objemová hmotnost	Odplavitelné částice (pod 0,063 mm)	Nasákavost	Tvarový index
Jednotka		[kg.m <sup>-3</sup> ]	[kg.m <sup>-3</sup> ]	[%]	[%]	[%]
0/4	DTK Žabčice	1530	2610	0,54	1,10	-
0/4	DTK Hulín	1580	2590	0,15	1,21	-
0/4	DTK Hrušovany	1520	2550	1,60	2,30	-
4/8	HDK Olbramovice	1360	2650	-	1,32	33
8/16	HDK Olbramovice	1380	2690	-	1,11	21



Obr. 8.2.2.1 – Srovnání množství odplavitelných částic pod 0,063 mm; v pořadí zleva Hulín – Žabčice – Hrušovany

Tab. č. 8.2.2.2 – Sítový rozbor kameniva – těžené drobné kamenivo prané, Žabčice – frakce 0/4 mm

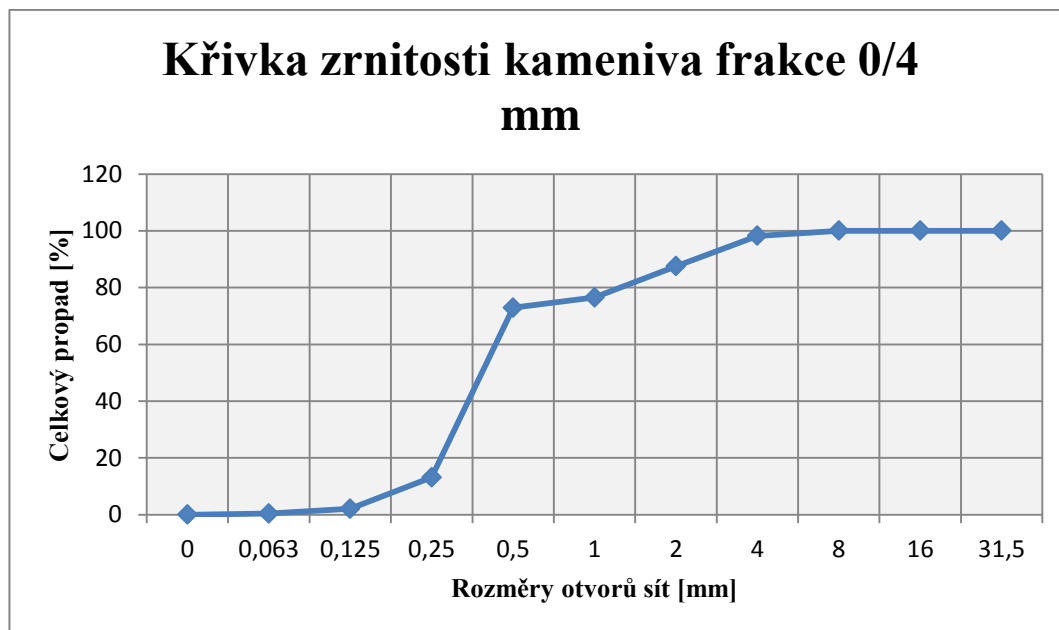
Frakce 0/4				
Rozměry otvorů na sítích	Dílčí zbytek na sítě	Celkový zbytek na sítě	Celkový propad sítím	Podíl jednotlivých frakcí
[mm]	[%]			
31,5	0,0	0,0	100,0	0,0
16	0,0	0,0	100,0	
8	0,0	0,0	100,0	
4	13,2	13,2	86,8	99,0
2	39,1	52,3	47,7	
1	23,7	76,0	24,0	
0,5	18,2	94,2	5,8	
0,25	4,8	99,0	1,0	
0,125	1,0	100,0	0,0	1,0
0,063	0,0	100,0	0,0	
Dno	0,0	100,0	0,0	
Součet	100	-	-	100



*Graf č. 8.2.2.1 – Křivka zrnitosti kameniva těžného praného frakce 0 /4 mm, Žabčice*

*Tab. č. 8.2.2.3 – Sítový rozbor kameniva – drobné kamenivo těžné prané, Hulín – frakce 0/4 mm*

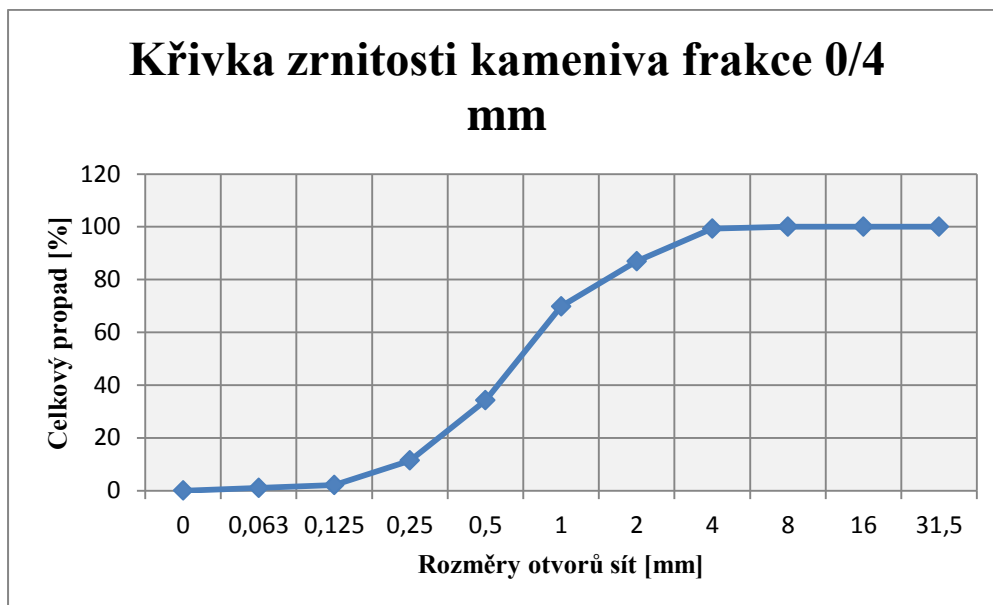
Frakce 0/4				
Rozměry otvorů na sítích	Dílčí zbytek na sítě	Celkový zbytek na sítě	Celkový propad sítím	Podíl jednotlivých frakcí
[mm]	[%]			
31,5	0,0	0	100	0
16	0,0	0	100	
8	0,0	0	100	
4	10,8	1,8	98,2	97,5
2	10,7	12,5	87,5	
1	11,0	23,5	76,5	
0,5	33,6	127,1	72,9	
0,25	29,8	86,9	13,1	
0,125	11,0	97,9	2,1	2,5
0,063	1,5	99,6	0,4	
Dno	0,6	100	0	
Součet	100	-	-	100



Graf č. 8.2.2.2 – Křivka zrnitosti kameniva frakce 0 /4 mm, Hulín

Tab. č. 8.2.2.4 – Sítový rozbor kameniva – drobné kamenivo těžené prané,  
Hrušovany – frakce 0/4 mm

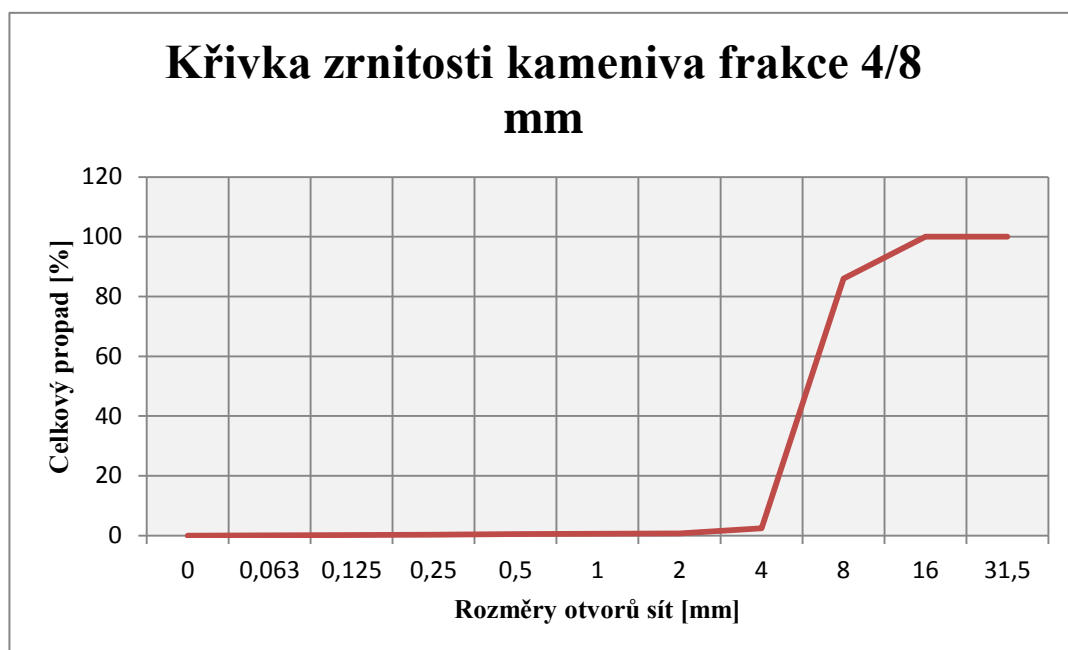
Frakce 0/4				
Rozměry otvorů na sítích	Dílčí zbytek na sítě	Celkový zbytek na sítě	Celkový propad sítím	Podíl jednotlivých frakcí
[mm]	[%]			
31,5	0	0	100	0
16	0	0	100	
8	0	0	100	
4	0,7	0,7	99,3	96,9
2	12,4	13,1	86,9	
1	17,1	30,2	69,8	
0,5	35,6	65,8	34,2	
0,25	22,8	88,6	11,4	
0,125	9,3	97,9	2,1	3,1
0,063	1,1	99,0	1	
Dno	1	100	0	
Součet	100	-	-	100



Graf č. 8.2.2.3 – Křivka zrnitosti kameniva frakce 0 /4 mm, Hrušovany

Tab. č. 8.2.2.5 – Sítový rozbor kameniva – hrubé kamenivo drcené, frakce 4/8 mm Olbramovic

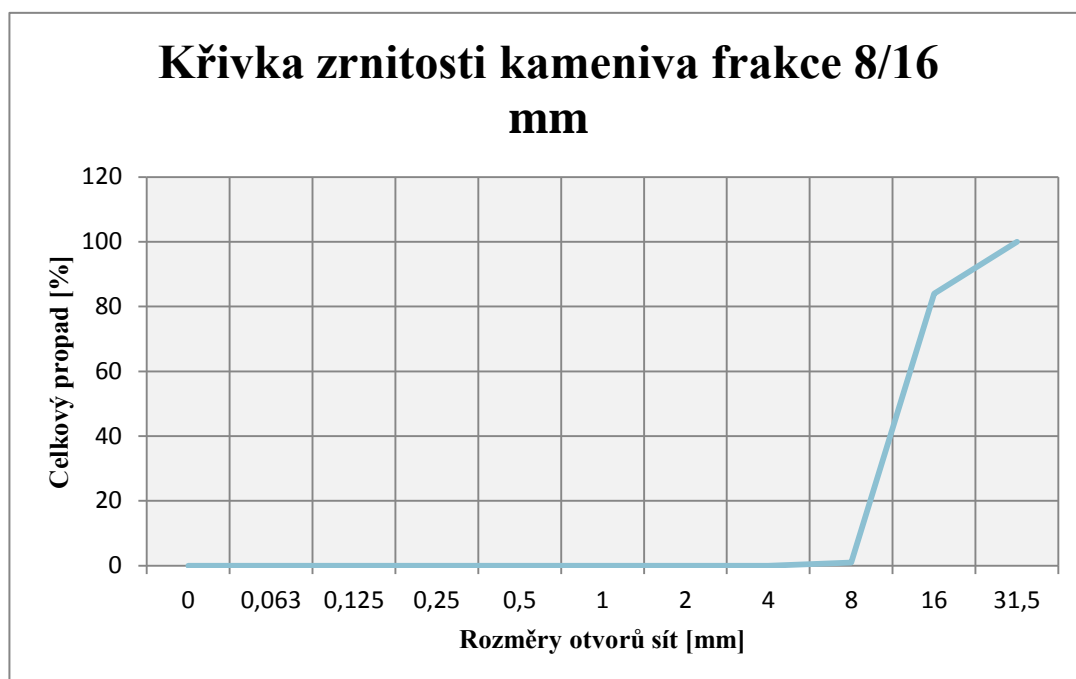
Frakce 4/ 8				
Rozměry otvorů na sítích	Dílčí zbytek na sítě	Celkový zbytek na sítě	Celkový propad sítím	Podíl jednotlivých frakcí
[mm]	[%]			
31,5	0,0	0,0	100,0	14
16	0,0	0,0	100,0	
8	14,0	14,0	86,0	
4	83,6	97,6	2,4	85,7
2	1,7	99,3	0,7	
1	0,1	99,4	0,6	
0,5	0,1	99,5	0,5	
0,25	0,2	99,7	0,3	
0,125	0,1	99,8	0,2	0,3
0,063	0,1	99,9	0,1	
Dno	0,1	100	0,0	
Součet	100	-	-	100



Graf č. 8.2.2.4 – Křivka zrnitosti hrubého drceného kameniva frakce 4 /8 mm, Olbramovice

Tab. Č. 8.2.2.6 – Sítový rozbor kameniva – hrubé kamenivo drcené, frakce 8/ 16 mm Olbramovice

Frakce 8/16				
Rozměry otvorů na sítích	Dílčí zbytek na sítě	Celkový zbytek na sítě	Celkový propad sítím	Podíl jednotlivých frakcí
[mm]	[%]			
31,5	0,0	0,0	100,0	99,0
16	16,0	16,0	84,0	
8	83,0	99,0	1,0	
4	1,0	100,0	0,0	1,0
2	0,0	100,0	0,0	
1	0,0	100,0	0,0	
0,5	0,0	100,0	0,0	
0,25	0,0	100,0	0,0	
0,125	0,0	100,0	0,0	0,0
0,063	0,0	100,0	0,0	
Dno	0,0	100,0	0,0	
Součet	100	-	-	100



*Graf č. 8.2.2.5 – Křivka zrnitosti hrubého drceného kameniva frakce 8 /16 mm Olbramovice*

### 8.2.3 Přísady

Pro účely této bakalářské práce byly použity přísady provzdušňovací i plastifikační. Oba druhy přísady byly od firmy Mapei.

- Plastifikační přísada Dynamon RC 730 – plastifikační přísada na bázi polykarboxylát – éteru
- Provzdušňovací přísada Mapeair LP 100

## 8.3 Přehled vyrobených zkušebních těles

- Pro stanovení pevnosti v tlaku po 7 dnech, pevnosti v tlaku po 28 dnech, stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou, Spacing factor, odolnosti betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám byly použity zkušební tělesa ve tvaru krychle o rozměru 150×150×150 mm.
- Pro stanovení mrazuvzdornosti betonu byly použity zkušební trámce o velikosti 100×100×400 mm.

## 8.4 Způsob uložení zkušebních těles

Veškerá zkušební tělesa vyrobená v rámci této bakalářské práce byla uložena po dobu 28 dní ve vodním uložení (tělesa pro stanovení 7 denní pevnosti v tlaku byla uložena ve vodním uložení po dobu 7 dní).



Obr. 8.4.1 – Vodní uložení zkušebních těles

## 8.5 Složení betonu

Na základě posouzení parametrů vstupních surovin byl proveden návrh betonu, z kterého vyšlo následující složení receptur.

Tab. č. 8.5.1 – Složení betonu

Receptura [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]		Ž – IA	Ž – IB	HUL – IA	HUL – IB	HRUŠ – IA	HRUŠ – IB
CEM I 42,5 R Mokrý		395	395	395	395	395	395
Voda		165	165	165	165	165	165
Vodní součinitel		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Plastifikační přísada Mapei Dynamon RC 730		2,97	2,87	2,97	2,87	2,97	2,97
Provzdušňovací přísada Mapeair LP 100		0,40	0,55	0,45	0,67	0,45	0,75
0 - 4	DTK Žabčice prané	832	832	-	-	-	-
0 - 4	DTK Hulín prané	-	-	832	832	-	-
0 - 4	DTK Hrušovany prané	-	-	-	-	832	832
4 - 8	HDK Olbramovice	318	318	318	318	318	318
8 - 16	HDK Olbramovice	611	611	611	611	611	611
Návrhová objemová hmotnost		2320	2320	2320	2320	2320	2320



Ž – Kamenivo Žabčice, HUL – Kamenivo Hulín, HRUŠ – Kamenivo Hrušovany

## 9 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Tab. č. 9.1 – Výsledky zjištěné na čerstvém betonu

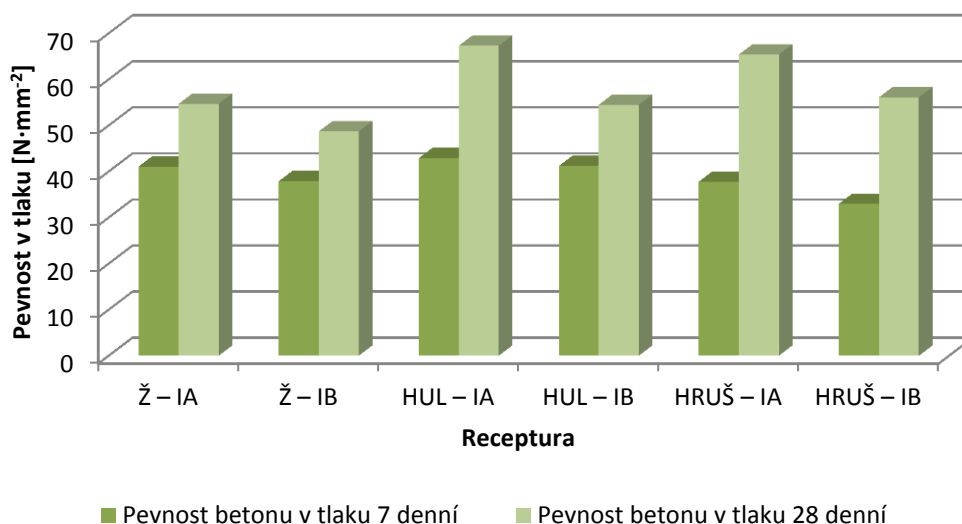
Receptura	Naměřené hodnoty sledovaných vlastností		
	Sednutí kužele	Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Objemová hmotnost čerstvého betonu
Jednotka	[mm]	[%]	[kg·m <sup>-3</sup> ]
Ž – IA	130	4,5	2310
Ž – IB	140	6,5	2280
HUL – IA	130	4,0	2320
HUL – IB	140	7,0	2270
HRUŠ – IA	130	4,2	2320
HRUŠ – IB	140	7,0	2270

Obsah vzduchu v čerstvém betonu se pohyboval u všech vyrobených receptur v požadovaných mezích. Objemová hmotnost korespondovala s obsahem vzduchu v čerstvém betonu. Sednutí kužele bylo ve všech případech stupeň S3.

Tab. č. 9.2 – Vlastnosti betonu z hlediska pevnostních charakteristik a hloubky průsaku tlakovou vodou

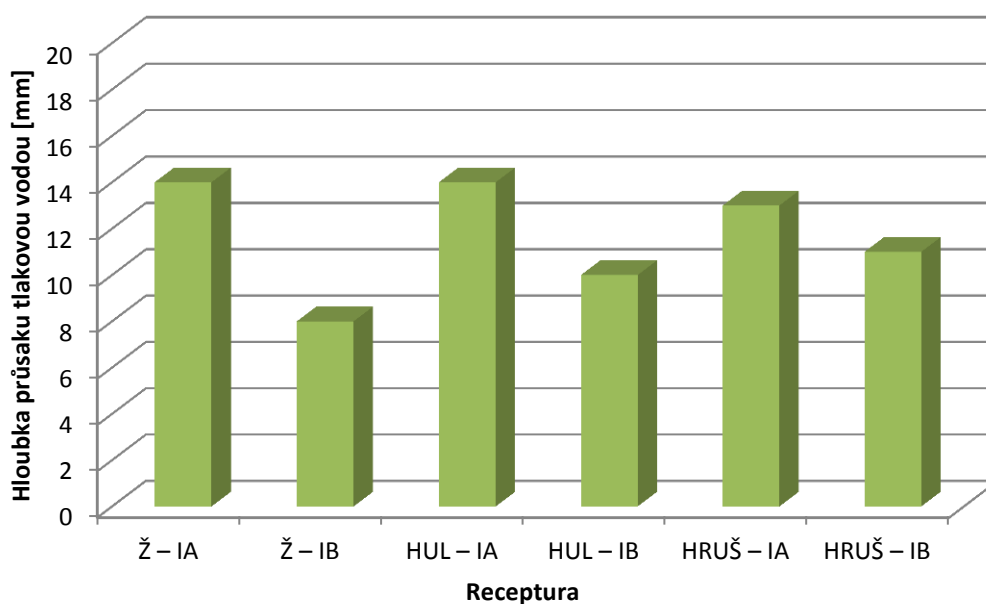
Receptura	Naměřené průměrné hodnoty sledovaných vlastností				
	D ztvrdlého betonu 7 denní	Pevnost betonu v tlaku 7 denní	D ztvrdlého betonu 28 denní	Pevnost betonu v tlaku 28 denní	Maximální hloubka průsaku tlakovou vodou
Jednotka	[kg·m <sup>-3</sup> ]	[N·mm <sup>-2</sup> ]	[kg·m <sup>-3</sup> ]	[N·mm <sup>-2</sup> ]	[mm]
Ž – IA	2290	41,1	2270	54,7	14
Ž – IB	2260	37,9	2240	48,7	8
HUL – IA	2310	42,9	2280	67,3	14
HUL – IB	2250	41,2	2250	54,5	10
HRUŠ – IA	2300	37,8	2290	65,4	13
HRUŠ – IB	2250	33,0	2230	56,1	11

## Porovnání pevnosti betonu v tlaku po 7 a 28 dnech



Graf č. 9.1 – Porovnání pevností betonu v tlaku po 7 a 28 dnech

## Porovnání hloubky průsaku tlakovou vodou



Graf č. 9.2 – Porovnání hloubky průsaku tlakovou vodou

Z grafu je patrné, že se zvyšujícím se obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu klesala pevnost v tlaku zkušebních těles, a to u každé z receptur. Nejvyšší pevnosti v tlaku dosáhl beton s použitým drobným kamenivem z Hulína. Drobné kamenivo z Hulína vykazovalo nejmenší hodnotu výskytu odplavitelných částic pod 0,063 mm.

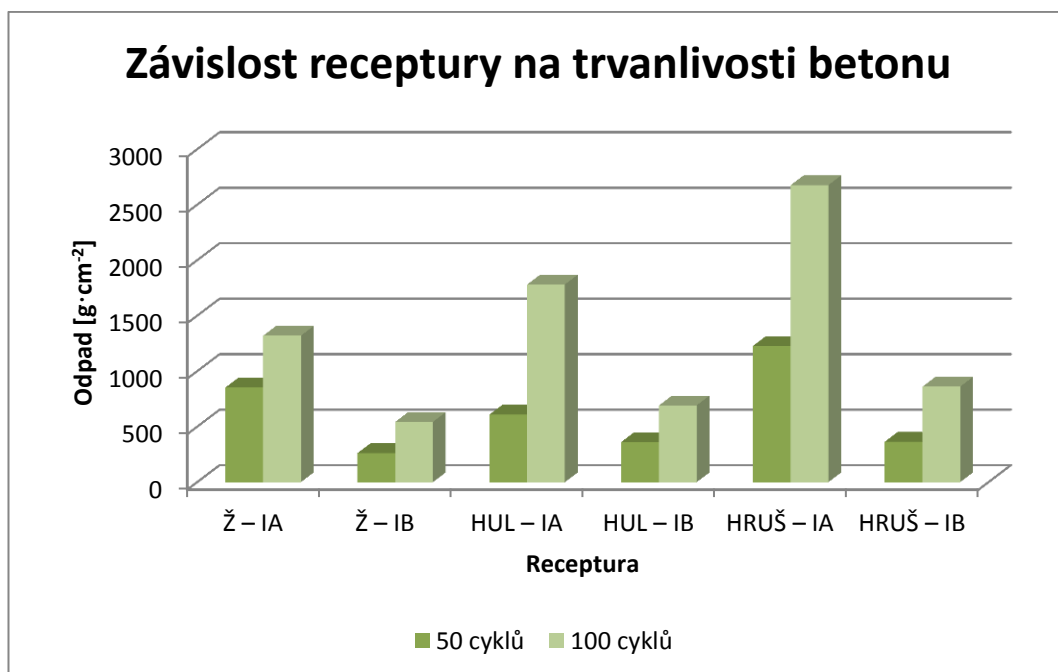
Co se týče hloubky průsaku tlakovou vodou, se zvyšujícím se obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu se snižuje hloubka průsaku tlakovou vodou. Všechny betony vyhověly maximální hranici hloubky průsaku, která je 20 mm dle ČSN P 73 2404.



Obr. č. 9.1 – Zkušební vzorek po zkoušce průsaku tlakovou vodou

Tab. č. 9.3 – Vlastnosti receptur Ž – I A,B z hlediska trvanlivosti (CHRL A)

	Průměrné naměřené hodnoty sledovaných cyklů		Značení dle normy ČSN 73 1326
	Počet cyklů		
	Cyklů		
Jednotka	[g·m <sup>-2</sup> ]		
Ž – IA	853,3	1319,9	1319,9 - 100
Ž – IB	261,8	543,2	543,2 - 100
HUL – IA	609,5	1781,5	1781,5 - 100
HUL – IB	363,3	692,3	692,3 - 100
HRUŠ – IA	1229,2	2677,1	2677,1 - 100
HRUŠ – IB	365,3	860,7	860,7 - 100



*Graf č. 9.3 – Porovnání množství odpadu po 50 a 100 cyklech CHRL A*

Zkouška odolnosti betonu proti působení účinkům chemických rozmrazovacích látek ukázala, že beton s vyšším obsahem vzduchu vykazuje větší odolnost vůči působení účinkům CHRL. Nejhuř dopadla receptura s drobným těžným kamenivem z Hrušovan. Tento druh kameniva se jeví jako nejméně kvalitní, jelikož obsahuje nejvíce odplavitelných částic a případných jílových podílů. Výsledky receptur s vyšším obsahem vzduchu s kamenivem z Hulína a Žabčic se téměř rovnají. Předpoklad byl, že největší odolnost vůči působení účinkům CHRL bude mít receptura s drobným těžným kamenivem z Hulína, protože má nejmenší obsah odplavitelných částic a jílových podílů. Výsledky receptur s vyšším obsahem vzduchu s kamenivem z Hulína a Žabčic se téměř rovnají. Nesrovnalosti ve výsledcích zkoušek byly pravděpodobně způsobeny nevhodnou povrchovou úpravou vzorků pro zkoušení betonu proti účinkům CHRL. Zkoušená plocha nebyla po vytvoření zkušebního tělesa upravena postupem uvedeným v normě, kdy se povrch zkušebních těles zarovná pilovitým pohybem ocelového pravítka.

Tab č. 9.4 – Vlastnosti receptur z hlediska obsahu vzduchu

Průměrné naměřené hodnoty sledovaných vlastností							
Parametr	Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Ztvrdlý beton			Čerstvý beton		
		A	A <sub>300</sub>	Součinitel rozložení L	A	A <sub>300</sub>	Součinitel rozložení L
Jednotka	[%]	[%]	[%]	[mm]	[%]	[%]	[mm]
Ž – IA	4,5	4,15	1,90	0,190	4,50	1,20	0,304
Ž – IB	6,5	6,06	2,95	0,140	6,60	2,80	0,190
HUL – IA	4,0	3,60	1,74	0,180	4,40	2,40	0,185
HUL – IB	7,0	6,50	2,12	0,240	6,20	3,70	0,127
HRUŠ – IA	4,2	4,07	2,84	0,150	3,30	0,90	0,347
HRUŠ – IB	7,0	5,96	2,90	0,200	5,20	3,00	0,169

Pozn.: A – Celkový obsah vzduchu; A<sub>300</sub> – Obsah mikroskopického vzduchu; L – Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů.



Obr. 9.2 – Připravený přístroj AVA – 3000

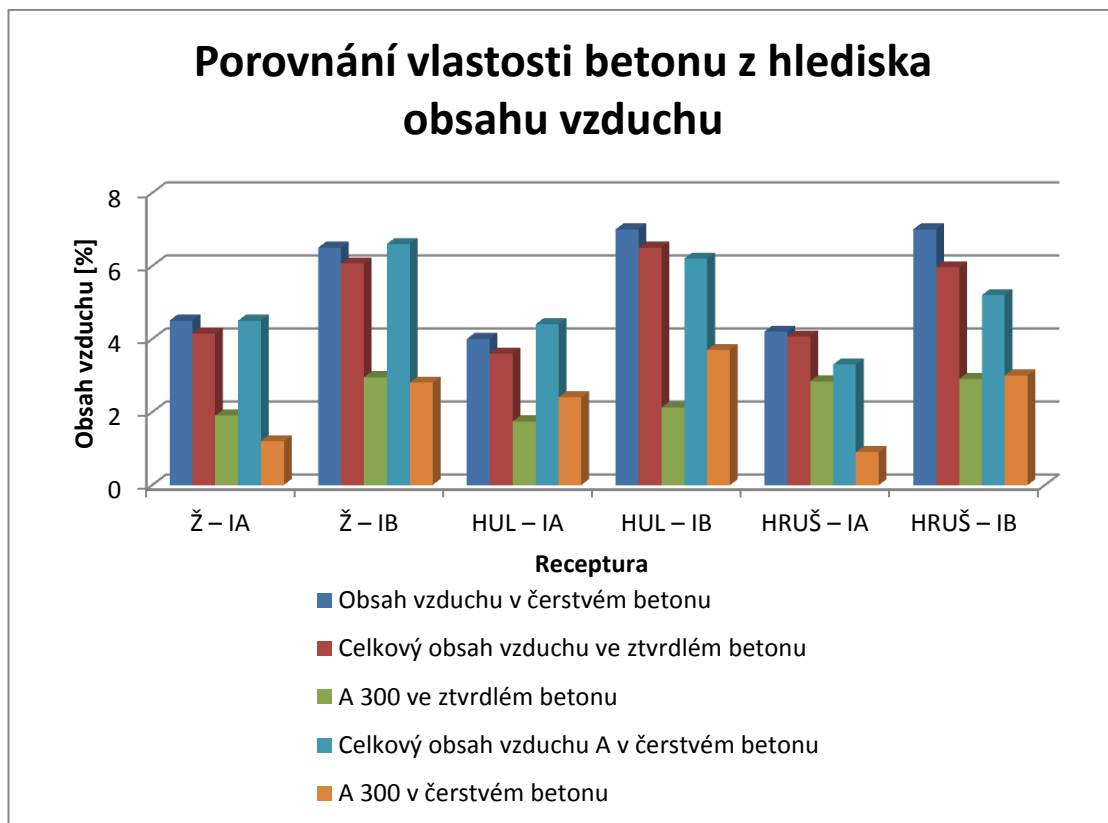


*Obr 9.3 – Příprava přístroje AVA – 3000*

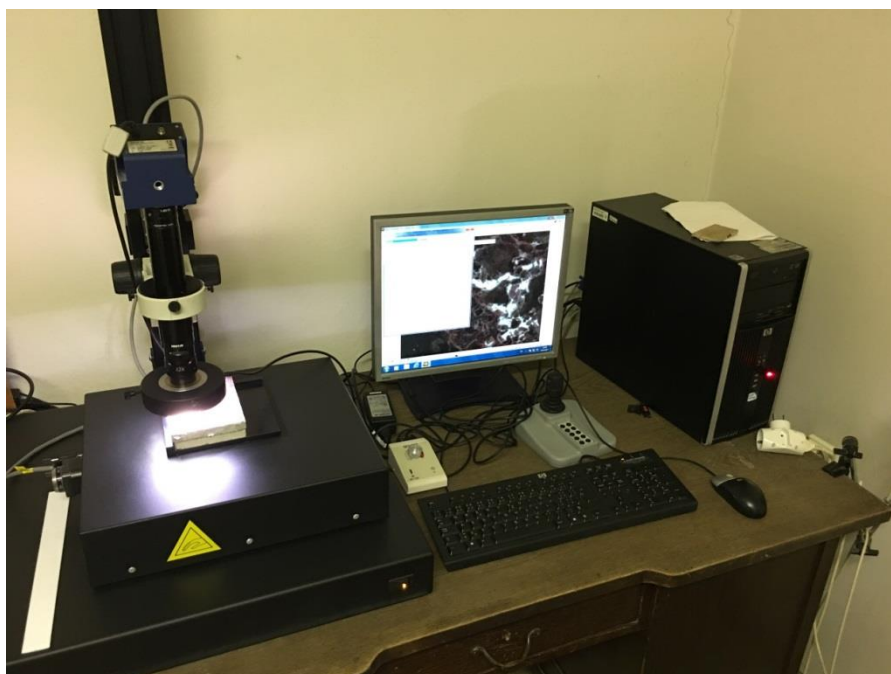


*Obr 9.4 – Odběr a odebraný vzorek pro zkoušku AVA - 3000*



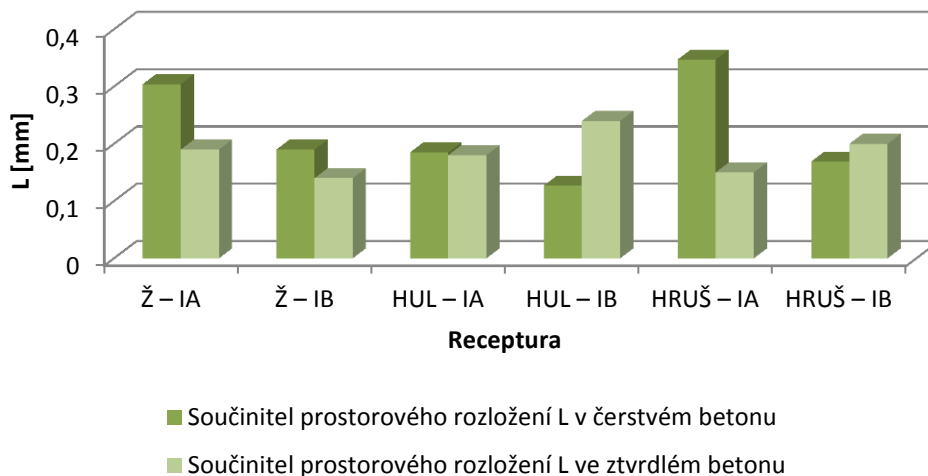


Graf č. 9.4 – Porovnání vlastností betonu z hlediska obsahu vzduchu



Obr. 9.5 – Zařízení pro zkoušku SF ve ztvrdlém betonu

### Porovnání vlastnosti betonu z hlediska součinitele prostorového rozložení pórů L



Graf č. 9.5 – Porovnání vlastnosti betonu z hlediska součinitele prostorového rozložení L

Měření provedené na betonech z hlediska obsahu vzduchu probíhalo na čerstvých i na ztvrdlých betonech. Počáteční stav značí obsah vzduchu naměřený tlakovou metodou dle ČSN EN 12350 – 7. Obsah vzduchu byl naměřen na čerstvém betonu také pomocí Air Void Analyseru. Hodnoty získané pomocí Air Void Analyseru byly ve dvou případech o něco málo vyšší (receptury Ž – IB, HUL – IA) než hodnoty získané metodou tlakovou. Obsah mikroskopického vzduchu ( $A_{300}$ ) byl měřen na čerstvém a ztvrdlém betonu. Hodnoty  $A_{300}$  zjištěné pomocí Air Void Analyseru byly v polovině případů (receptura HUL – IA, HUL – IB, HRUŠ – IB) vyšší, než u měření  $A_{300}$  provedeném na ztvrdlém betonu. Součinitel prostorového rozložení pórů L se pohyboval u všech měření v rozmezí od 0,127 do 0,347 mm. Hodnoty Spacing factoru v čerstvém a ztvrdlém betonu přibližně odpovídaly až na recepturu Ž – IA a recepturu HRUŠ – IA, kde byl v čerstvém betonu naměřen o hodně větší Spacing factor než ve ztvrdlém betonu. Menších hodnot dosahoval AVA test v případě méně provzdušněných betonů, kdy se mohl projevit vliv požadovaného minimálního obsahu vzduchu v betonu pro podmínky zkoušení betonu (3,5 %).

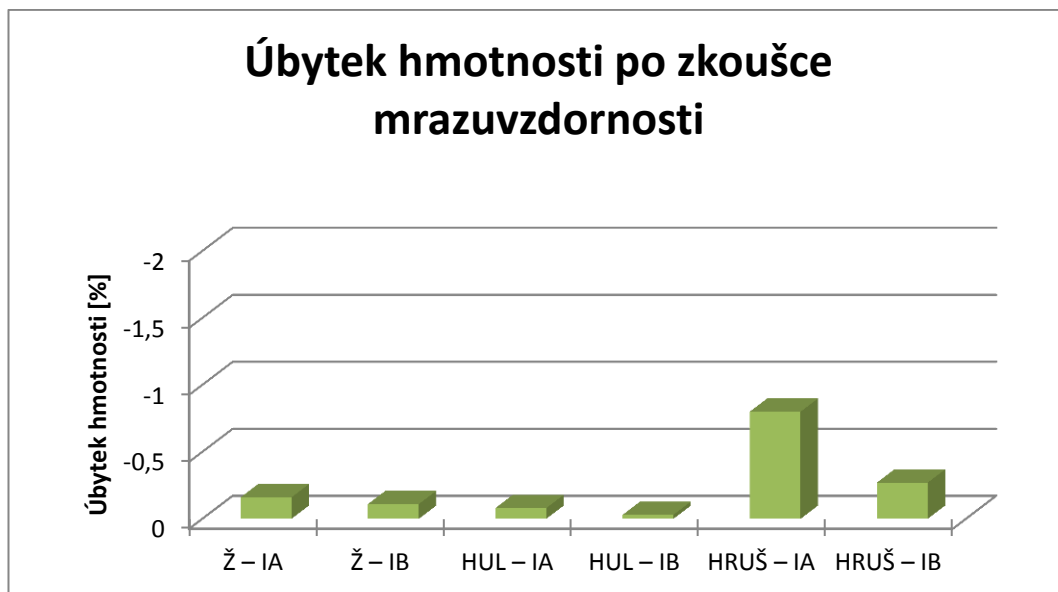


Tab. č. 9.5 – Vlastnosti receptur z hlediska odolnosti proti cyklickému zmrazování a rozmrazování

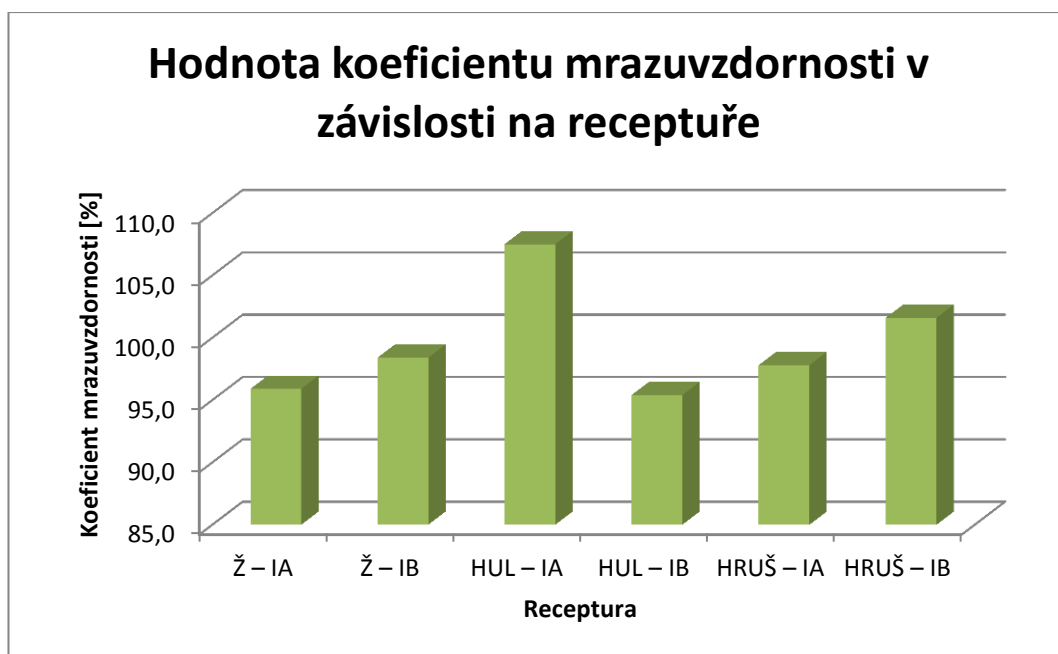
Receptura	Naměřené hodnoty sledovaných vlastností				
	Počet cyklů	$\Delta m$	$f_{cf,ref}$	$f_{cf,f}$	SM
Jednotka	-	[%]	$[N \cdot mm^{-2}]$	$[N \cdot mm^{-2}]$	[%]
Ž – IA	100	-0,16	6,8	6,5	95,9
Ž – IB		-0,11	6,4	6,3	98,4
HUL – IA		-0,08	7,2	7,7	107,5
HUL – IB		-0,03	6,8	6,5	95,4
HRUŠ – IA		-0,80	7,5	7,3	97,8
HRUŠ – IB		-0,27	7,0	7,1	101,6



Obr. 9.6 – Zkušební lis pro zkoušku v tahu za ohybu



Graf č. 9.6 – Porovnání úbytku hmotnosti z hlediska různých receptur



Graf č. 9.7 – Hodnota koeficientu mrazuvzdornosti v závislosti na receptuře

Všechny receptury betonu vyhověly z hlediska koeficientu mrazuvzdornosti, tj. všechny receptury mají koeficient mrazuvzdornosti větší než 75 %. Některé receptury mají dokonce koeficient mrazuvzdornosti vyšší než 100 %. Úbytek hmotnosti u všech vyrobených receptur byl maximálně -0,80 % z původní hmotnosti zmrazovaného trámce.

## 10 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala studiem vlivu vneseného provzdušnění na parametry provzdušněných betonů. V teoretické části bakalářské práce byl definován provzdušněný beton a jeho možnosti aplikace do stavebních konstrukcí vystavených vlivům prostředí s působením mrazu, rozmrazování a chemických rozmrazovacích látek (XF1 – XF4). Následně bylo provedeno shrnutí vlastností vstupních surovin tvořících provzdušněný beton. Byly popsány základní typy provzdušňovacích přísad, a jejich kompatibilita s plastifikačními přísadami. Část práce byla zaměřena na možnosti zjištění distribuce prostorového rozložení vzduchových pórů (L) v čerstvém i ve ztvrdlém betonu. Podrobněji byl popsán přístroj na stanovení obsahu vzduchu a Spacing factoru v čerstvém betonu, přístroj AVA – 3000. Velká výhoda tohoto přístroje je zjištění součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů již při raném stádiu betonáže, čímž je možné předpovědět Spacing factor ve ztvrdlém betonu, a tím například předpokládanou odolnost proti působením účinků chemických rozmrazovacích látek a vody. Poznatky získané v teoretické části bakalářské práce sloužily jako vstupní informace pro část experimentální.

V rámci experimentální části bakalářské práce bylo posouzení vneseného provzdušnění na vlastnosti čerstvých a ztvrdlých betonů, zejména s ohledem na trvanlivost betonů. Sledován byl také součinitel prostorového rozložení pórů v čerstvém a ztvrdlém betonu.

Na základě vlastností zvoleného kameniva frakce 0/4 z Hulína, Žabčic a Hrušovan a kameniva 4/8 a 8/16 z Olbramovic a pojivových složek bylo v experimentální části vyrobeno 6 receptur. Jednalo se o tři sady receptur, které se lišily použitým drobným těženým kamenivem o dvou parametrech vneseného provzdušnění, a to v mezích 4,0 – 4,5 % a 6,5 – 7,0 %. Pro všechny betony byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R Mokrý, plastifikační přísada Dynamon RC 730 a provzdušňovací přísada Mapeair LP 100. Konzistence všech betonů byla dle zkoušky sednutím kužele S3. Objemová hmotnost čerstvých a ztvrdlých betonů odpovídala obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu. V čerstvém stavu od 2270 do 2320 kg·m<sup>-3</sup> a ve ztvrdlém stavu od 2230 do 2290 kg·m<sup>-3</sup> po 28 dnech. Pevnost betonu v tlaku odpovídala obsahu vzduchu vneseného do betonu. Pohybovala se v mezích cca od 55 do 67 N·mm<sup>-2</sup> po 28 dnech. Nejvyšších pevnostních charakteristik v tlaku dosáhl beton s kamenivem z Hulína o vneseném provzdušnění 4,0 % a to 67,3 N·mm<sup>-2</sup>. Nejnižší pevnosti

v tlaku po 28 dnech dosáhl beton s kamenivem z Žabčic s obsahem vzduchu 6,5 % a to o 28 % nižší pevnosti v tlaku, než beton s kamenivem z Hulína. Maximální hloubka průsaku tlakovou vodou nebyla u žádné z receptur větší než 14 mm, všechny vyrobené betony lze klasifikovat jako vodotěsné. Se zvětšujícím se vneseným provzdušněním se zmenšovala hloubka průsaku tlakovou vodou.

Co se týče odolnosti betonu proti působením účinků chemických rozmrazovacích látek, dosáhl nejlepších výsledků beton s drobným těžným kamenivem z Žabčic. Nesrovnalosti ve zkoušce CHRL vyplynuly pravděpodobně z nesprávné přípravy vzorků pro zkoušku odolnosti proti působení CHRL. Rozdíl mezi betonem s nejlepšími výsledky (beton s kamenivem z Žabčic s obsahem vzduchu 6,5 %) a betonem, který dosahoval nejhorších hodnot (beton s kamenivem z Hrušovan a obsahem vzduchu 4,2 %) po 100 cyklech odolnosti proti působení účinků CHRL byl 490 %. Hmotnost odpadu byla 4,9 krát větší u betonu s kamenivem z Hrušovan, než u betonu s kamenivem z Žabčic. Porovnání těchto dvou betonů o srovnatelném obsahu vzduchu, tj. beton s kamenivem z Žabčic s obsahem vzduchu 6,5 %, a beton s kamenivem z Hrušovan s obsahem vzduchu 7,0 % dopadlo lépe pro beton s kamenivem z Žabčic, a to o 59 %. To tedy znamená, že Beton s kamenivem z Hrušovan měl o 59 % větší odpad po 100 cyklech CHRL, než beton s kamenivem z Žabčic. Nejtěsnějšího výsledku dosáhly betony s kamenivem z Žabčic a Hulína s obsahem vzduchu 6,5 % Žabčice a 7,0 % Hulín, ve prospěch betonu s kamenivem z Žabčic. Odpad betonu po 100 cyklech CHRL byl u betonu s kamenivem z Hulína větší o 27 %.

Zatřídění betonů dle zkoušky odolnosti proti působení účinků chemických rozmrazovacích látek po 100 cyklech bylo následující. Beton s drobným těžným kamenivem z Žabčic o obsahu vzduchu 4,5 % lze klasifikovat dle stupně porušení jako silně narušený. Značení 1319,9 - 100. Beton s drobným těžným kamenivem z Žabčic o obsahu vzduchu 6,5 % lze klasifikovat dle stupně porušení jako narušený. Značení 543,2 - 100. Beton s drobným těžným kamenivem z Hulína o obsahu vzduchu 4,0 % lze klasifikovat dle stupně porušení jako silně narušený. Značení 1781,5 - 100. Beton s drobným těžným kamenivem z Hulína o obsahu vzduchu 7,0 % lze klasifikovat dle stupně porušení jako narušený. Značení 692,3 - 100. Beton s drobným těžným kamenivem z Hrušovan o obsahu vzduchu 4,2 % lze klasifikovat dle stupně porušení jako silně narušený. Značení 2677,1 - 100. Beton s drobným těžným kamenivem z Hrušovan o obsahu vzduchu 7,0 % lze

klasifikovat dle stupně porušení jako narušený. Značení 860,7 - 100. Co se týče požadavku normy ČSN P 73 2404 na odolnost vůči zmrazování a rozmrazování dle ČSN 73 1326 vyhověly požadavku A/100/1000 pro předpokládanou životnost konstrukce 100 let pouze betony s drobným těženým kamenivem z Žabčic o obsahu vzduchu v betonu 6,5 %, beton s drobným těženým kamenivem z Hulína s obsahem vzduchu v betonu 7,0 % a beton s drobným těženým kamenivem z Hrušovan s obsahem vzduchu v betonu 7,0 %.

Jako mrazuvzdorné lze označit všechny betony, protože součinitel mrazuvzdornosti nebyl menší než 95 %. Některé betony dosáhly hodnot součinitele mrazuvzdornosti nad 100 %. Jedná se o receptury HUL - IA a HRUŠ - IB. Na betonech byl stanoven Spacing factor v čerstvém i ztvrdlém betonu. Cílem bylo porovnat zkoušku a její výsledky na ztvrdlém a čerstvém betonu, zdali spolu nějakým způsobem souvisejí. Co se týče celkového obsahu vzduchu A, v čerstvém betonu byla hodnota ve většině případů o něco vyšší než hodnota získaná z mikroskopického stanovení obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu. Na základě provedených měření nelze jednoznačně stanovit, zdali je mezi provedenými měřeními nějaká závislost. Pro stanovení závislosti je potřeba většího souboru výsledků, a tomu se bude věnovat následná diplomová práce.

# 11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Co je to beton* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.zapa.cz/o-betonu/> [2] *Provzdušněný beton* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.mujsbeton.cz/provzdusneny-beton>
- [3] Adéla Halešová, Studium vlivu příměsí na trvanlivost provzdušněných betonů. Brno, 2015. 64 s., 74 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [4] KLAUDOVÁ, Dana. Možnosti testování a zlepšování trvanlivosti provzdušněných betonů. Brno, 2012. 135 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [5] Přednášky z předmětu BJ015 – technologie betonu 2; Zápisky, letní semestr 2017.
- [6] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [7] HEIDELBERG CEMENT, *Příručka technologa*. Aktualizované vydání, 2013 [online] [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/tisk-a-media/publikace-a-prezentace.html>
- [8] HELA, R. *Technologie betonu II*. BJ15 - Technologie betonu II. Brno: 2007.
- [9] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 9788087093757.
- [10] *Journal of Environmental Chemical Engineering: Waste glass in the production of cement and concrete – A review* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343714000645>
- [11] Instruction and Maintenance Manual for Air Void Analyzer, AVA - 3000: For assessment of tge Air Void Structures in fresh, plastic concrete. Denmark, 2014.
- [12] AVA - *German Instruments* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://germann.org/products-by-application/air-void-system-parameters/ava>
- [13] ČSN EN 12350 – 2. Zkoušení čerstvého betonu: Část 2: Zkouška sednutím. Říjen 2009.
- [14] ČSN EN 12350 – 6. Zkoušení čerstvého betonu: Část 6: Objemová hmotnost. Říjen 2009.

- [15] ČSN EN 12350 – 7. Zkoušení čerstvého betonu: Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Říjen 2009.
- [16] ČSN EN 12390 – 7. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Říjen 2009.
- [17] ČSN EN 12390 – 3. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Listopad 2012.
- [18] ČSN EN 12390 – 8. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Říjen 2009.
- [19] ČSN 731326 /Z1. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Listopad 2003.
- [20] ČSN EN 480 – 11. Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody: Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. Duben 2006.
- [21] *Technický list cementu CEM I 42,5 Mokrý* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>
- [22] VLIV OBSAHU VZDUCHU VE ZTVRDLÉM PROVZDUŠNĚNÉM BETONU NA HODNOTU STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI A PEVNOSTI V TLAKU STANOVENÉ NDT METODAMI. *Beton - Technologie - Konstrukce - Sanace* [online]. 2011 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-4-73\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-4-73_0.pdf)
- [23] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [24] Control of air in Concrete. *Concrete technology TODAY*. Skokie, Illinois 60077-1083, 1998, **1998**(19/1), 4.
- [25] HENRICHSEN, M.SC, Anders. Air-entraining and frost resistance properties of concrete. *Presentation of paper at the ACI Fall Convention in Phoenix*. Phoenix, 2002, **2002**(1), 10.
- [26] ČSN 73 1322. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Technický a zkušební ústav stavební v Praze - pracoviště Brno, Ing. Dr. Adolf Pavlík. Brno: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, Praha, 1968.
- [27] ČSN 73 1322 ZMĚNA Z1. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Český normalizační institut, 2003.
- [28] ČSN EN 206. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 2014.
- [29] *Kamenivo* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html>
- [30] *Zkoušky kameniva* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/zkousky-kameniva>

- [31] TP 137: VYLOUČENÍ ALKALICKÉ REAKCE KAMENIVA V BETONU NA STAVBÁCH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_137\\_pl.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_137_pl.pdf)
- [32] Improving Variability and Precision of Air-Void Analyzer (AVA) Test Results and Developing Rational Specification Limits. *National Concrete Pavement Technology Center* [online]. **2008**, 98 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.intrans.iastate.edu/reports/ava.pdf>
- [33] DU, Lianxiang a Kevin J. FOLLIARD. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 2005, **35**(8), 1463-1471 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.07.026. ISSN 0008-8846
- [34] VALENZA, John J. a George W. SCHERER. A review of salt scaling: II. Mechanisms. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 2007, **37**(7), 1022-1034 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.03.003. ISSN 0008-8846.
- [35] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. Český normalizační institut, 2008.
- [36] Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete. *Designation: C 457 – 98* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.c-s-h.ir/wp-content/uploads/2015/01/C-457.pdf>

## 12 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ASR – Alkalicko křemičitá reakce  
 TKP – technické kvalitativní podmínky  
 CHRL – Chemické romzrazovací látky  
 ČSN – Česká státní norma  
 EN – Evropská norma  
 ASTM – Americká státní technická norma  
 SF – Spacing factor  
 L – Součinitel prostorového rozložení pórů  
 Ž – IA – Beton s kamenivem Žabčice 0/4 s obsahem vzduchu 4,5 %  
 Ž – IB – Beton s kamenivem Žabčice 0/4 s obsahem vzduchu 6,5 %  
 HUL – IA – Beton s kamenivem Hulín 0/4 s obsahem vzduchu 4,0 %  
 HUL – IB – Beton s kamenivem Hulín 0/4 s obsahem vzduchu 7,0 %  
 HRUŠ – IA – Beton s kamenivem Hrušovany 0/4 s obsahem vzduchu 4,2 %  
 HRUŠ – IB – Beton s kamenivem Hrušovany 0/4 s obsahem vzduchu 7,0 %  
 AVA – 3 000 – Přístroj na měření Spacing Factoru v čerstvém betonu  
 ČB – Čerstvý beton



ZB - ztvrdlý beton  
 D – Objemová hmotnost betonu  
 SM – součinitel mrazuvzdornosti  
 $\Delta m$  – úbytek hmotnosti  
 DTK – drobné těžené kamenivo  
 HDK – Hrubé drcené kamenivo  
 D – objemová hmotnost betonu  
 mm – milimetr  
 $f_{cf,ref}$  – pevnost v tahu za ohybu referenčního trámce po 28 dnech  
 $f_{cf,f}$  – pevnost v tahu za ohybu zmrazovaného trámce po ukončení požadovaného počtu cyklů

## 13 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 2.1 – Schéma měření pórů pro stanovení součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů L [mm] [6].....	11 -
Obr. č. 2.2 – Závislost modulu pružnosti na obsahu vzduchu v betonu [22] .....	12 -
Obr. 2.2.1 – Rozdělení velikosti pórů a vzdálenost mezi nimi v provzdušněném betonu (Roberts, Schmeier)[6] .....	15 -
Obr. 2.1.2.1 – Vliv obsahu vzduchu na pevnost v tlaku betonu [9] .....	17 -
Obr. 5.2.1 – Schéma přístroje AVA [10] .....	31 -
Obr. 5.2.2 – Pomůcky pro přístroj AVA – 3000 [12].....	32 -
Obr. 5.3.1.1 – Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku Spacing factoru [20].....	34 -
Obr. 5.4.1 – Odebírání vzorku pro AVA [11].....	38 -
Obr. 5.4.2 – Srovnání výsledků dle ASTM C 457 metoda A a B [36] .....	39 -
Obr. 8.2.2.1 – Srovnání množství odplavitelných částic pod 0,063 mm; v pořadí zleva Hulín – Žabčice – Hrušovany.....	50 -
Obr. 8.4.1 – Vodní uložení zkušebních těles .....	56 -
Obr. č. 9.1 – Zkušební vzorek po zkoušce průsaku tlakovou vodou .....	59 -
Obr. 9.2 – Připravený přístroj AVA – 3000.....	61 -
.....	62 -
Obr. 9.3 – Příprava přístroje AVA – 3000 .....	62 -
.....	62 -
Obr. 9.4 – Odběr a odebraný vzorek pro zkoušku AVA - 3000 .....	62 -
Obr. 9.5 – Zařízení pro zkoušku SF ve ztvrdlém betonu .....	63 -
Obr. 9.6 – Zkušební lis pro zkoušku v tahu za ohybu .....	65 -

## 14 SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 8.2.2.1 – Křivka zrnitosti kameniva těžného praného frakce 0 /4 mm, Žabčice.....	51 -
Graf č. 8.2.2.2 – Křivka zrnitosti kameniva frakce 0 /4 mm, Hulín .....	52 -
Graf č. 8.2.2.3 – Křivka zrnitosti kameniva frakce 0 /4 mm, Hrušovany.....	53 -
Graf č. 8.2.2.4 – Křivka zrnitosti hrubého drceného kameniva frakce 4 /8 mm, Olbramovice.....	54 -
Graf č. 8.2.2.5 – Křivka zrnitosti hrubého drceného kameniva frakce 8 /16 mm Olbramovice.....	55 -
Graf č. 9.1 – Porovnání pevností betonu v tlaku po 7 a 28 dnech .....	58 -
Graf č. 9.2 – Porovnání hloubky průsaku tlakovou vodou .....	58 -
Graf č. 9.3 – Porovnání množství odpadu po 50 a 100 cyklech CHRL A.....	60 -
Graf č. 9.4 – Porovnání vlastností betonu z hlediska obsahu vzduchu.....	63 -
Graf č. 9.5 – Porovnání vlastností betonu z hlediska součinitele prostorového rozložení L .....	64 -
Graf č. 9.6 – Porovnání úbytku hmotnosti z hlediska různých receptur.....	66 -
Graf č. 9.7 – Hodnota koeficientu mrazuvzdornosti v závislosti na receptuře.....	66 -

## 15 SEZNAM TABULEK

Tab č. 4.1.1 Přehled hlavních složek cementářského slínku [23] .....	22 -
Tab č. 4.2.1.5.1 – Kategorie pro maximální hodnoty odolnosti proti zmrazování a rozmrazování .....	26 -
Tab č. 5.4.1 – Srovnání SF v ČB a ZB .....	36 -
Tab č. 6.3.1 – Mezní hodnoty pro složení betonu (životnost 50 let) .....	44 -
Tab č. 6.3.2 – Mezní hodnoty pro složení betonu (životnost 100 let)....	44 -
Tab č. 8.2.1.1 – Mechanické vlastnosti cementu CEM I 42,5 R Mokrý ...	48 -
Tab. č. 8.2.2.1 – Vlastnosti použitého kameniva.....	49 -
Tab. č. 8.2.2.2 – Sítový rozbor kameniva – těžné drobné kamenivo prané, Žabčice – frakce 0/4 mm.....	50 -
Tab. č. 8.2.2.3 – Sítový rozbor kameniva – drobné kamenivo těžné prané, Hulín – frakce 0/4 mm.....	51 -
Tab. č. 8.2.2.4 – Sítový rozbor kameniva – drobné kamenivo těžné prané, Hrušovany – frakce 0/4 mm .....	52 -
Tab. č. 8.2.2.5 – Sítový rozbor kameniva – hrubé kamenivo drcené, frakce 4/8 mm Olbramovic .....	53 -

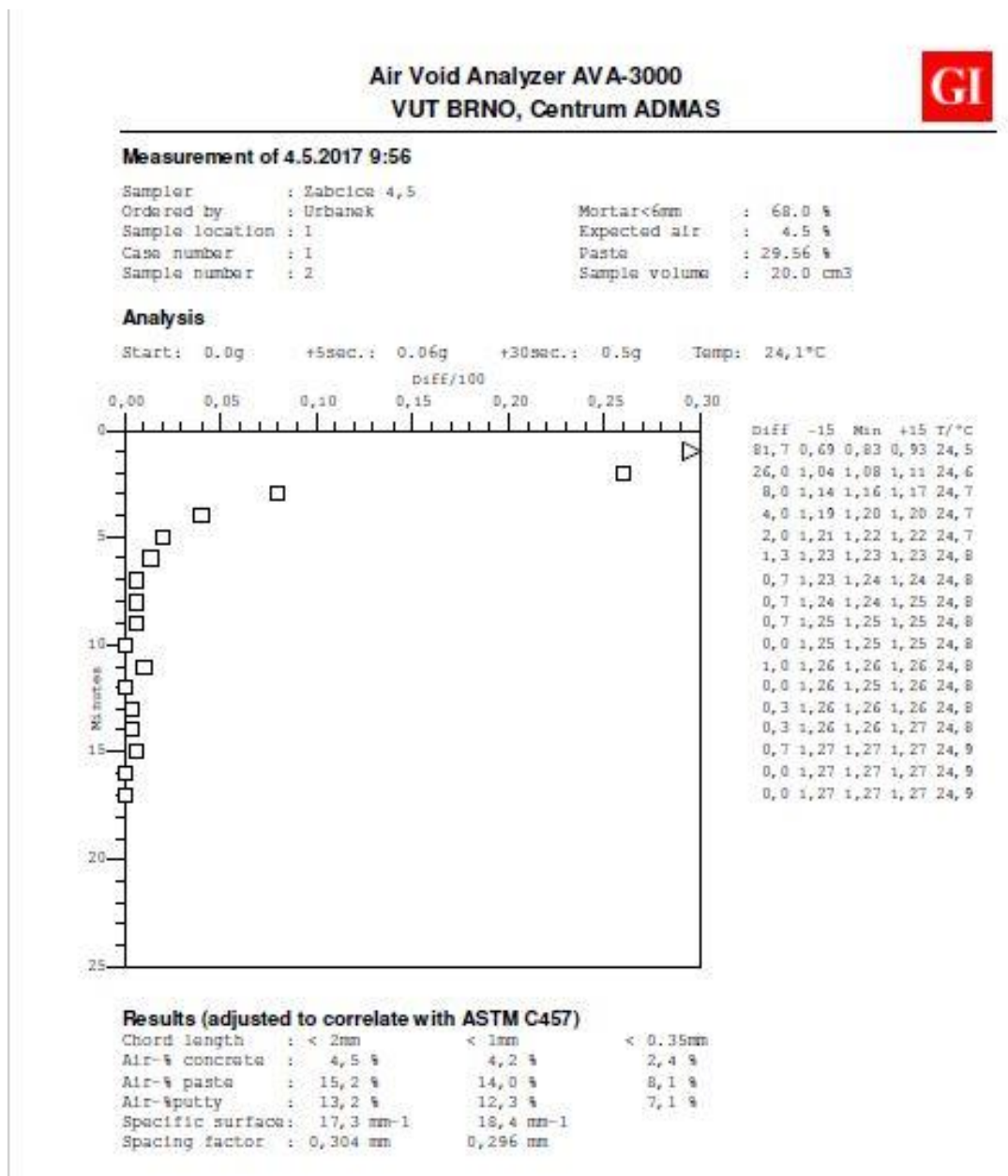
Tab. Č. 8.2.2.6 – Sítový rozbor kameniva – hrubé kamenivo drcené, frakce 8/ 16 mm Olbramovice .....	54 -
Tab. Č. 8.5.1 – Složení betonu .....	56 -
Tab. Č. 9.1 – Výsledky zjištěné na čerstvém betonu .....	57 -
Tab. Č. 9.2 – Vlastnosti betonu z hlediska pevnostních charakteristik a hloubky průsaku tlakovou vodou .....	57 -
Tab. Č. 9.3 – Vlastnosti receptur Ž – I A,B z hlediska trvanlivosti (CHRL A)...	59 -
Tab. Č. 9.4 – Vlastnosti receptur z hlediska obsahu vzduchu .....	61 -
Tab. Č. 9.5 – Vlastnosti receptur z hlediska odolnosti proti cyklickému zmrazování a rozmrazování .....	65 -

## 16 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Záznam měření z AVA Testu .....	76 -
.....	76 -
Příloha č. 2 – Záznam měření Spacing factoru ve ztvrdlém betonu .....	78
Příloha č. 3 – Technický list cementu CEM I 42,5 R Mokrý .....	81 -
.....	81 -

# 17PŘÍLOHY

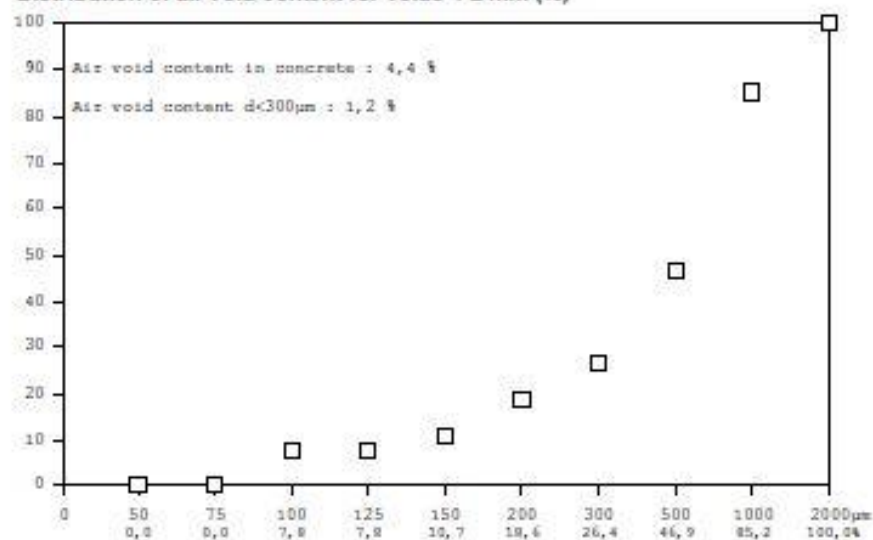
Příloha č. 1 – Záznam měření z AVA Testu



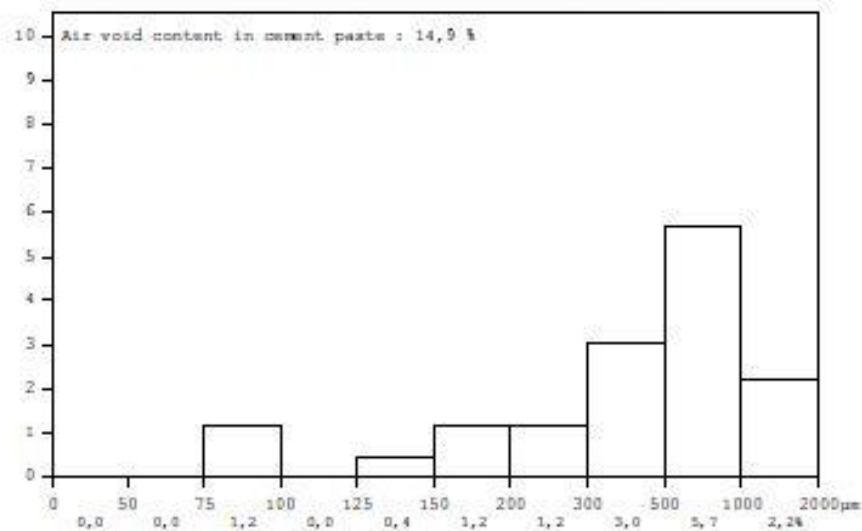
Measurement of 4.5.2017 9:56

Cava number : 1  
Sample number : 2

Distribution of air void content for voids < 2 mm (%)



Distribution of air void content in cement paste for voids < 2 mm (%)



Příloha č. 2 – Záznam měření Spacing factoru ve ztvrdlém betonu

Celková délka soustavy měřících průmek $T_{tot}$	2400.0
--	--------

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozpětí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část pórů, které by mohly být zaznamenány	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění <sup>1)</sup>	naměřeno $C_i$	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou $T_{tot}$	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění <sup>1)</sup>	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění <sup>1)</sup>	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená sloupcem 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		$\mu\text{m}$		$\text{mm}^{-1}$	$\text{mm}^2$	$\text{mm}^3$	$\text{mm}^3$	$\text{mm}^3$	%	%
	1	0 až 10	179	0.07458	0,0001178	633.13526	528.55177	$5,24 \times 10^{-7}$	0.028	0.03
	2	15 až 20	69	0.02875	0,0002749	104.58348	43.81960	$4,19 \times 10^{-6}$	0.018	0.05
	3	25 až 30	63	0.02625	0,0004320	60.76389	22.56355	$1,41 \times 10^{-5}$	0.032	0.08
	4	35 až 40	54	0.02250	0,0005890	38.20034	7.48506	$3,35 \times 10^{-5}$	0.025	0.10
	5	45 až 50	55	0.02292	0,0007461	30.71527	6.72649	$6,54 \times 10^{-5}$	0.044	0.15
	6	55 až 60	52	0.02167	0,0009032	23.98878	-1.43557	$1,13 \times 10^{-4}$	-0.016	0.13
	7	65 až 80	139	0.05792	0,0022780	25.42435	9.65238	$2,68 \times 10^{-4}$	0.259	0.39
	8	85 až 100	110	0.04583	0,0029060	15.77197	4.80705	$5,24 \times 10^{-4}$	0.252	0.64
	9	105 až 120	93	0.03875	0,0035340	10.96491	2.85778	$9,05 \times 10^{-4}$	0.259	0.90
	10	125 až 140	81	0.03375	0,0041630	8.10713	3.75870	$1,44 \times 10^{-3}$	0.541	1.44
	11	145 až 160	50	0.02083	0,0047910	4.34843	0.88838	$2,14 \times 10^{-3}$	0.190	1.63
	12	165 až 180	45	0.01875	0,0054190	3.46005	1.66870	$3,05 \times 10^{-3}$	0.509	2.14
	13	185 až 200	26	0.01083	0,0060476	1.79134	-0.01862	$4,19 \times 10^{-3}$	-0.008	2.13
	14	205 až 220	29	0.01208	0,0066760	1.80997	1.01132	$5,58 \times 10^{-3}$	0.564	2.70

(pokračování)

Tabulka 1

(dokončení)

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozpětí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část pórů, které by mohly být zaznamenány	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění <sup>1)</sup>	naměřeno $C_i$	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou $T_{tot}$	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění <sup>1)</sup>	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění <sup>1)</sup>	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená hodnotou ve sloupci 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		$\mu\text{m}$		$\text{mm}^{-1}$	$\text{mm}^2$	$\text{mm}^{-3}$	$\text{mm}^{-3}$	$\text{mm}^3$	%	%
	15	225 až 240	14	0.00583	0,0073040	0.79865	0.01080	$7,24 \times 10^{-3}$	0.008	2.70
	16	245 až 260	15	0.00625	0,0079330	0.78785	0.05779	$9,20 \times 10^{-3}$	0.053	2.76
	17	265 až 280	15	0.00625	0,0085610	0.73005	0.23127	$1,15 \times 10^{-2}$	0.266	3.02
	18	285 až 300	11	0.00458	0,0091890	0.49878	-0.05202	$1,41 \times 10^{-2}$	-0.073	2.95
	19	305 až 350	34	0.01417	0,0257200	0.55080	0.35406	$2,24 \times 10^{-2}$	0.793	3.74
	20	355 až 400	14	0.00583	0,0296500	0.19674	0.04784	$3,35 \times 10^{-2}$	0.160	3.90
	21	405 až 450	12	0.00500	0,0335800	0.14890	0.02668	$4,77 \times 10^{-2}$	0.127	4.03
	22	455 až 500	11	0.00458	0,0375000	0.12222	0.10601	$6,54 \times 10^{-2}$	0.693	4.72
	23	505 až 1000	23	0.00958	0,5910000	0.01622	0.01325	$5,24 \times 10^{-1}$	0.694	5.42
	24	1005 až 1500	7	0.00292	0,9837000	0.00296	0.00296	1,77	0.525	5.94
	25	1505 až 2000	0	0.00000	1,3760000	0.00000	0.00000	4,19	0.000	5.94
	26	2005 až 2500	0	0.00000	1,7690000	0.00000	-0.00019	8,18	-0.158	5.79
	27	2505 až 3000	1	0.00042	2,1620000	0.00019	0.00019	$1,41 \times 10^{+1}$	0.272	6.06
	28	3005 až 4000	0	0.00000	5,5020000	0.00000	0.00000	$3,35 \times 10^{+1}$	0.000	6.06

<sup>1)</sup> Hodnoty ve sloupci 1, 2, 5 a 8 jsou konstantní.

**Celková délka soustavy měřících přímek**

$$T_{\text{tot}} = T_s + T_a = 2400.0 \quad \text{mm}$$

**Celkový obsah vzduchu**

$$A = (T_a * 100) / T_{\text{tot}} = 6.2 \quad \text{objemových \%}$$

**Celkový počet měřených tětív**

$$N = \sum C_i = 1202$$

**Měrný povrch systému vzduchových pórů (Specifický povrch)**

$$\alpha = (4 * N) / T_a = 32.4 \quad \text{mm}^{-1}$$

**Poměr tmel : vzduch**

$$R = P/A = 4.7$$

**Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů**

$$L = 0.14 \quad \text{mm}$$

**Obsah mikroskopického vzduchu**

$$A_{300} = 2.95 \quad \text{objemových \%}$$



Příloha č. 3 – Technický list cementu CEM I 42,5 R Mokrá

# CEM I 42,5 R

## Portlandský cement

### EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list  
červen 2016

Fyzikální a mechanické vlastnosti			
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	14	EN 196-1
	2 dny	29	EN 196-1
	7 dní	51	EN 196-1
	28 dní	61	EN 196-1
	56 dní	66	EN 196-1
	90 dní	67	EN 196-1
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4	EN 196-1
	2 dny	6	EN 196-1
	7 dní	8	EN 196-1
	28 dní	9	EN 196-1
	56 dní	9	EN 196-1
	90 dní	9	EN 196-1
Normální konzistence [%]		27,7	EN 196-3
Počátek tuhnutí [min]		201	EN 196-3
Konec tuhnutí [min]		264	EN 196-3
Objemová stálost [mm]		0,8	EN 196-3, Le Chatelier
Měrný povrch [m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup> ]		381	EN 196-6, Blaine
Hydratační teplo [J.g <sup>-1</sup> ]	7 dní	310	EN 196-8

Chemické vlastnosti			
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka
Obsah [%]	CaO	64,2	EN 196-2
	SiO <sub>2</sub>	19,5	EN 196-2
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7	EN 196-2
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2	EN 196-2
	MgO	1,3	EN 196-2
	SO <sub>3</sub>	3,2	EN 196-2
	Cl <sup>-</sup>	0,047	EN 196-2
	K <sub>2</sub> O	0,78	EN 196-2
	Na <sub>2</sub> O	0,09	EN 196-2
	Na <sub>2</sub> O ekvivalent [%]	0,6	EN 196-2
Nerozpustný zbytek [%]		0,7	EN 196-2
Ztráta žíháním [%]		3,3	EN 196-2

Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	95-100 %
Doplňující složka		0-5 %

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří siran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404																	
Bez rizika	Koroze způsobená karbonátací				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

a) Při chemické siranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 - koncentrace siranových iontů SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> vyšší než 600 mg/litr v podzemní vodě nebo 3000 mg/kg (v případě kapilárního sání 2000 mg/kg) v rostlé zemině - se musí použít siranovzdorný cement SR. Při obsahu SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - do 1500 mg/litr je možné použít CEM I s dostatečnou dávkou pucolanové příměsi (například alespoň 20 % popílku).